

Masterarbeit

von cand. aer. Karl Planke

**Untersuchung verschiedener Messverfahren für
Flüssigkeitsfilmdicken und Erprobung
an einem Strömungsprüfstand**

Dezember 2018

**Institut für Verbrennungstechnik
der Luft- und Raumfahrt
Universität Stuttgart**

Masterarbeit

von cand. aer. Karl Planke

**Untersuchung verschiedener Messverfahren für
Flüssigkeitsfilmdicken und Erprobung
an einem Strömungsprüfstand**

Dezember 2018

ausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. M. Aigner

Institut für Verbrennungstechnik der Luft- und Raumfahrt (IVLR)
Universität Stuttgart

mitbetreut und angefertigt bei

Dr. O. Lammel

M.Sc. D. Schäfer

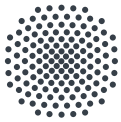
Dipl.-Ing. J. Grohmann

Hiermit versichere ich,

1. dass ich diese Masterarbeit selbstständig mit Unterstützung von Dr. Oliver Lammel, M.Sc. Dominik Schäfer und Dipl.-Ing. Jasper Grohmann angefertigt habe,
2. dass ich keine anderen als die angegebenen Quellen benutzt habe und alle wörtlich oder sinngemäß aus anderen Werken übernommenen Aussagen als solche gekennzeichnet sind,
3. dass die eingereichte Arbeit weder vollständig noch in wesentlichen Teilen Gegenstand eines anderen Prüfungsverfahrens gewesen ist,
4. dass die Arbeit weder vollständig noch in Teilen ohne Zustimmung der Prüferin bzw. des Prüfers bereits veröffentlicht wurde,
5. dass das elektronische Exemplar mit den anderen Exemplaren übereinstimmt,
6. dass ich bei der Erstellung der Arbeit die einschlägigen Bestimmungen zum Urheber-schutz fremder Beiträge entsprechend den Regeln guter wissenschaftlicher Praxis eingehalten habe.

Soweit meine Arbeit fremde Beiträge (z.B. Bilder, Zeichnungen, Textpassagen etc.) enthält, habe ich diese Beiträge als solche gekennzeichnet (Zitat, Quellenangabe) und eventuell erforderlich gewordene Zustimmungen der Urheber zur Nutzung dieser Beiträge in meiner Arbeit eingeholt. Mir ist bekannt, dass ich im Falle einer schuldhaften Verletzung dieser Pflichten die daraus entstehenden Konsequenzen zu tragen habe.

Karl Planke



Masterarbeit

für Herrn cand. aer. Karl Planke

Untersuchung verschiedener Messverfahren für Flüssigkeitsfilmdicken und Erprobung an einem Strömungsprüfstand

Aufgabenstellung:

Am Institut für Verbrennungstechnik werden technische Verbrennungsprozesse mit numerischen Modellen, modernen experimentellen Techniken und kinetischen Methoden untersucht. Das Institut gehört zu den weltweit führenden auf dem Gebiet der Verbrennungsforschung. Wir untersuchen Brenner und Brennkammersysteme für Gasturbinen und erforschen gasturbinenbasierte Kraftwerksanlagen für nachhaltige zentrale und dezentrale Strom- und Wärmeversorgungen. In der Abteilung für Verbrennungsdiagnostik arbeiten Sie in einem Team von ca. 20 WissenschaftlerInnen an innovativen Technologien zur Energiewandlung. Wir entwickeln und betreiben verschiedenste laserdiagnostische Verfahren. Damit können wir die turbulenten Strukturen in den Verbrennungszonen auflösen und den Verbrennungsablauf genau analysieren. Quantitative Messdaten bilden die Grundlage für die Entwicklung innovativer Brennerkonzepte, sowie für die Überprüfung und Weiterentwicklung numerischer Simulationsmodelle. Neben gasförmigen Brennstoffen werden auch flüssige Brennstoffe untersucht.

Im Rahmen von Entwicklungstätigkeiten an einem Injektorkonzept soll die Dicke von Brennstofffilmen auf Teilen des Brennersystems untersucht werden. Ziel der Masterarbeit ist die Recherche und Bewertung unterschiedlicher Messverfahren zur Bestimmung von Filmdicken. Eine Erprobung von zwei Verfahren anhand eines vereinfachten Strömungsprüfstandes mit generischem Wandfilmerzeuger ist ebenfalls Bestandteil der Untersuchungen.

Arbeitsschritte:

- Einarbeitung in das Thema Wandfilme und Filmdickenmessungen für flüssige Brennstoffe
- Recherche und Bewertung existierender optischer und weiterer Messverfahren zur Filmdickenbestimmung
- Inbetriebnahme eines Prüfstandes zum Test von zwei der gefundenen Verfahren an einem generischen Wandfilmerzeuger
- Durchführung von Wandfilmmessungen
- Auswertung und Interpretation der Messergebnisse
- Verfassen der Masterarbeit

Ort und Dauer:

Die Masterarbeit ist am IVLR durchzuführen und innerhalb von 6 Monaten abzuschließen.

Betreuer:

Dr. O. Lammel

Ausgabe: 11.06.2018

Abgabe: 11.12.2018

*Ich bedanke mich
bei all meinen Unterstützern am
Institut für Verbrennungstechnik des DLR Stuttgart.*

*Mein besonderer Dank für die sowohl fachlich als auch persönlich
kompetente Betreuung gilt Dr. Oliver Lammel, Dominik Schäfer und Jasper Grohmann.*

*Für die Arbeit an der Konstruktion des Strömungsprüfstandes danke ich Jens Kramer,
für die Fertigung desselben der Werkstatt unter Leitung von Jens Kreeb.*

*An alle Studenten aus Raum B 226: Danke für Rat und Tat,
ob Planung, Auswertung oder Formulierung,
ich stieß nie auf taube Ohren.*

Kurzfassung

In der vorliegenden Masterarbeit wurden verschiedene Verfahren zur Bestimmung der Dicke von Flüssigkeitsfilmen untersucht. Als Entscheidungsgrundlage für die durchzuführenden Versuche wurden die prinzipiell möglichen Verfahren in einer Literaturstudie zusammengetragen. Anhand der Leistungsfähigkeit bezüglich des definierten Anforderungsprofils der Messaufgabe erfolgte eine Beurteilung der jeweiligen Eignung. Die spezifischen Bedingungen in der Versuchsumgebung eines Hochdruckprüfstandes wurden dabei ebenfalls berücksichtigt. Für zukünftige Projekte soll dort die Untersuchung von Filmdicken auf Teilen eines Brennersystems möglich sein. Vor der Integration in die genannte Zielumgebung wurden im Rahmen dieser Masterarbeit Erprobungsversuche mit zwei ausgewählten Messsystemen durchgeführt, einem chromatisch-konfokalen und einem Lasertriangulationssensor. Dazu wurde ein vereinfachter Strömungsprüfstand mit generischem Wandfilmerzeuger in Betrieb genommen. Die erzeugten schubspannungsgetriebenen Wandfilme wurden unter Laborbedingungen untersucht. Die Auswertung und Gegenüberstellung der aufgenommenen Messdaten zeigte, dass innerhalb des abgedeckten Parameterbereiches der Lasertriangulationssensor die definierten Anforderungen erfüllt. Der chromatisch-konfokale Sensor wurde in Bezug auf die vorliegende Messaufgabe als ungeeignet eingeschätzt.

Abstract

Within this master thesis various measurement techniques for liquid film thickness were screened by means of a literature review. As part of an assessment the performance of the identified methods was taken into account as well as their integration suitability regarding the specific conditions of a high-pressure test stand. The latter is important since future projects include the investigation of liquid films on parts of a burner system at real operating conditions. Supporting the projected integration of the respective equipment, two measuring instruments were considered for proving: a chromatic confocal sensor and a laser triangulation sensor. A simplified flow test rig was put into operation for experimental investigations. It contained a generic device to generate liquid wall films. Measurements were conducted under laboratory conditions. Analysis and comparison of the acquired data revealed the laser triangulation sensor to meet the requirements within the parameter area covered whereas the chromatic confocal sensor was not suitable in the present case.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungen	III
Tabellen	V
Formelzeichen	VI
Abkürzungen	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Kontext und Motivation	1
1.2 Technischer Hintergrund und Ziel der Arbeit	2
2 Grundlagen der Wandfilmströmungen	5
2.1 Relevanz in technischen Systemen	5
2.2 Entstehung von flüssigen Wandfilmen	8
2.2.1 Interaktionsmechanismen	8
2.2.2 Systematisierung komplexer Aufprallphänomene	12
2.3 Dynamik schubspannungsgetriebener Fluidfilme	15
3 Messverfahren für Flüssigkeitsfilmdicken	19
3.1 Nadelkontakt	19
3.2 Elektrizität	21
3.2.1 Elektrische Leitfähigkeit	21
3.2.2 Elektrische Kapazität	23
3.3 Akustik	25
3.4 Strahlungsdämpfung	27
3.4.1 Mikrowellenstrahlung	27
3.4.2 Hochenergiestrahlung	28
3.5 Lichtabsorption	29
3.6 Lichtreflexion	31
3.6.1 Äußere Reflexion	32
3.6.2 Innere Reflexion	33
3.6.3 Interferometrie	34
3.6.4 Chromatisch-konfokales Messverfahren	35
3.6.5 Laser Focus Displacement	36
3.6.6 Lasertriangulation	38

3.7	Laserinduzierte Fluoreszenz	39
3.8	Refractive Index Matching	41
4	Erprobung an einem Strömungsprüfstand	43
4.1	Auswahl der Messtechnik	43
4.2	Versuchsaufbau	49
4.3	Messdatenauswertung und Ergebnisse	51
5	Fazit	57
5.1	Zusammenfassung	57
5.2	Ausblick	58
	Literatur	59

Abbildungen

1.1	Längsschnitt eines Einzeldüsen-FLOX [®] -Brenners	3
2.1	Rolls-Royce Trent 1000 Turbofan-Triebwerk, schematische Darstellung des Airblast-Zerstäubers der Brennkammer	6
2.2	Physikalische Effekte bei der Gemischaufbereitung im Ansaugtrakt eines Ottomotors	7
2.3	Übersicht charakteristischer Interaktionsarten eines Tropfens beim Aufprall auf eine Flüssigkeitsoberfläche	9
2.4	Partielle Tropfenreflexion an benetzter Wand bei senkrechtem Tropfenaufprall	10
2.5	Tropfendestruktion an benetzter Wand bei senkrechtem Tropfenaufprall . . .	11
2.6	RAYLEIGH- bzw. WORTHINGTON-Jet in Wasser mit großem Sekundärtropfen	12
2.7	Aufprall eines Wassertropfens auf eine superhydrophobe Oberfläche	12
2.8	Aufprall eines Ethanoltröpfens auf eine beheizte Wand bei verschiedenen Wandtemperaturen	14
2.9	Visualisierung einer Filmströmung im atmosphärischen ebenen Versuchsstand	16
2.10	Stabilitätsdiagramm für verschiedene Mischungen von Wasser und Glyzerin .	17
2.11	Stabilitätsgrenzen von schubspannungsgetriebenen Wandfilmen, Vergleich der experimentellen Ergebnisse verschiedener Autoren	18
2.12	Typische Messgrößen bei der Untersuchung von Wandfilmströmungen	18
3.1	Anwendung des Nadelkontaktverfahrens in Kombination mit einem Stromfluss-Detektor, verschiedenartige Ausführungen	20
3.2	Leitfähigkeitsmethode, Untersuchung verschiedener Sondenbauformen	22
3.3	Leitfähigkeitsmethode, Verwendung wandbündiger Elektroden, Anordnung an mehreren Positionen in Umfangsrichtung um einen Kanal mit Kreisquerschnitt	23
3.4	Kapazitätsmethode, verschiedene Bauformen wandbündiger Elektroden . . .	24

3.5	Versuchsaufbau zur Dickenmessung an ruhenden Wasserfilmen mithilfe eines breitbandigen Ultraschall-Transducers	26
3.6	Schematischer Aufbau eines hydraulischen Gleitlagerprüfstandes, Schmiermittelfilmdickenmessung mittels integriertem Ultraschall-Transducer	27
3.7	Messung von Filmdicken mithilfe von Mikrowellenabsorption	28
3.8	Gammastrahlen-Densitometer	29
3.9	Messprinzip mit Lichtabsorption im Durchlichtverfahren	30
3.10	Einseitige Vermessung eines Flüssigkeitsfilmes mithilfe von Retro-Reflexion an der Filmlaufläche, schematischer Versuchsaufbau	31
3.11	Messprinzip optischer Doppelfasern, äußere Reflexion an der Filmoberfläche .	32
3.12	Charakteristisches Lichtbild bei innerer Totalreflexion an der Filmoberfläche	33
3.13	Interferometrisches Messverfahren, Entstehung von Interferenzstreifenmustern, Weißlichtinterferometrie	34
3.14	Chromatisch-konfokales Messprinzip	36
3.15	Optischer Aufbau eines Laser Focus Displacement Meters (LFDM)	37
3.16	Messprinzip eines Lasertriangulationssensors, Arbeitsweise mit Streulicht . .	38
3.17	Schematischer Versuchsaufbau zur Filmdickenbestimmung mithilfe von LIF .	39
3.18	ERLIF-Methode, Überlappung von Emissions- und Absorptionsspektren . .	41
3.19	Physikalisches Prinzip bei der Anwendung des RIM	42
4.1	Zeichnungen von CKS und LTS, jeweils mit Halterung laut Herstellerempfehlung	48
4.2	Generischer Strömungsprüfstand zur Untersuchung von Wandfilmen	50
4.3	Längsschnitt und Vorderansicht des Versuchsträgers	50
4.4	Nullreferenzmessung, Gegenüberstellung von CKS und LTS	52
4.5	Vermessung eines ruhenden Wasserfilmes, Gegenüberstellung von CKS und LTS	52
4.6	Untersuchung welliger Filme, konstante Filmbeladung, Variation der Luftgeschwindigkeit, Gegenüberstellung von CKS und LTS	53
4.7	Messdatenausschnitt mit hoher Oberflächenkrümmung, LTS	54
4.8	Messdatenausschnitt mit niedriger Oberflächenkrümmung, LTS	55
4.9	Qualitativer Vergleich der Messdaten von CKS und LTS anhand von Messfrequenz und axialer Auflösung	56

Tabellen

4.1	Anforderungen an die gesuchte Messtechnik	43
4.2	Vergleich der Versuchsbedingungen am HBK-S und im Laborversuch	44
4.3	Übersicht verschiedener Messverfahren für Flüssigkeitsfilmdicken	45
4.4	Gegenüberstellung technischer Daten der ausgewählten Messtechnik	49
4.5	Betriebspunkte für Vergleichsmessungen bei der Erprobung	51

Formelzeichen

Lateinische Notation

B	Breite des Strömungskanals
D_T	Tropfendurchmesser
Fr	FROUDE-Zahl
f_s	Messfrequenz, Abtastfrequenz
h^*	dimensionslose Filmdicke
H	Höhe des Strömungskanals
I	Intensität
I_0	Primärintensität der Strahlung
I_e	Intensität in der Empfangsfaser
I_M	gemessene Intensität nach Durchgang durch den Film
k'	Absorptionskoeffizient
k_s	Wandabstand der Phasenwechselwirkung
L	Länge des Strömungskanals
\dot{m}_w	Wassermassenstrom
n	Brechungsindex
n_w	Brechungsindex von Wasser
Oh	OHNESORGE-Zahl
r	Abstand zur Filmoberfläche
r_0	Abstand zur Wandoberfläche
Re	REYNOLDS-Zahl
T_L	LEIDENFROST-Temperatur
t_s	Messdauer

T_w	Wandtemperatur
\dot{V}_f	Flüssigkeitsvolumenstrom
\dot{V}_w	Wasservolumenstrom
v_f	Filmgeschwindigkeit
v_g	Gas- bzw. Luftgeschwindigkeit
v_T	Tropfengeschwindigkeit
We	WEBER-Zahl
Δx	laterale Auflösung
x	wandparallele Koordinate
y	wandnormale Koordinate

Griechische Notation

α	Aufprallwinkel
δ	Filmdicke, Schichtdicke
$\bar{\delta}$	mittlere Filmdicke
$\Delta\delta_{min}$	axiale Auflösung, minimal detektierbare Änderung der Filmdicke
λ	Wellenlänge
Λ_f	Filmbeladung, breitenbezogener Filmvolumenstrom
μ	dynamische Viskosität
ϱ	Dichte
ϱ_w	Dichte von Wasser
σ	Oberflächenspannung
$\tau_{g,f}$	Schubspannung an der Grenzfläche zwischen flüssiger und Gasphase
ϑ	Winkel

Abkürzungen

CKS	chromatisch-konfokaler Sensor
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
ERLIF	Emission Reabsorption Laser-induced Fluorescence
FLOX	„flameless oxidation“, FLOX [®] , engl. etwa „Oxidation ohne Flamme“
HBK-S	Hochdruckbrennkammer-Prüfstand Stuttgart
HEL	Heizöl extra leicht
LCI	Low Coherence Interferometry, engl. Interferometrie mit niedriger Kohärenz der Lichtquelle
LED	Light-emitting Diode, engl. lichtemittierende Diode, Leuchtdiode
LFDM	Laser Focus Displacement Meter, engl. etwa Laserfokus-Wegsensor
LIF	Laser-induced Fluorescence, engl. laserinduzierte Fluoreszenz
LTS	Lasertriangulationssensor
MB	Messbereich
PAH	polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
RICM	Reflection Interference Contrast Microscopy, engl. Interferenzreflexionsmikroskopie, Reflexionskontrastmikroskopie
RIM	Refractive Index Matching, engl. etwa Abgleich des Brechungsindex
SCR	Selective Catalytic Reduction, engl. selektive katalytische Reduktion
TDLAS	Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, engl. Laserabsorptionsspektroskopie mit abstimmbaren Dioden
UHC	Unburnt Hydro Carbons, engl. unverbrannte Kohlenwasserstoffe
VT	Verbrennungstechnik

1 Einleitung

1.1 Kontext und Motivation

Verbrennungsprozesse spielen eine zentrale Rolle bei der Nutzbarmachung von chemisch in Brennstoffen gebundener Energie. Detailliertes Wissen über Prozesse und Einflussparameter ist für die gezielte Optimierung solcher Vorgänge aus wirtschaftlicher und ökologischer Sicht unabdingbar. Eine wichtige Kenngröße stellt die Qualität des Brennstoff-Luft-Gemisches dar. Durch die Gewährleistung einer möglichst homogenen Durchmischung unmittelbar vor dem Ablauf der eigentlichen Verbrennungsreaktion werden die freigesetzten Mengen an Schadstoffen und Kohlenstoffdioxid verringert. Insgesamt können auf diese Weise positive Auswirkungen auf Effizienz und Umweltverträglichkeit von Verbrennungsprozessen erzielt werden.

Insbesondere die Gemischaufbereitung bei der Nutzung flüssiger fossiler Brennstoffe in Verbrennungskraftmaschinen wie Motoren oder Gasturbinen ist bereits seit mehreren Dekaden Gegenstand zahlreicher Forschungsaktivitäten. Befeuert wird dieses Interesse aktuell stärker denn je zuvor durch politische Vorgaben, etwa in Form von Grenzwerten für den Ausstoß bestimmter Verbrennungsprodukte in die Umgebung. Letztere werden aufgrund ihrer den Treibhauseffekt verstärkenden und damit umweltschädigenden Wirkung als Schadstoffe klassifiziert. Ein branchenübergreifendes Streben nach der Minimierung von Schadstoffemissionen zur Mitigation des fortschreitenden Klimawandels hat sich in manchen Teilen der Welt entwickelt.

Kohlenstoffmonoxid CO , verschiedene Arten von Stickoxiden NO_x und Rußpartikel sind typische Schadstoffe, die bei Verbrennungsreaktionen entstehen. Ein Teil des Brennstoffs wird meist nicht bzw. nicht vollständig verbrannt und bleibt als sog. unburnt hydrocarbons (UHC, engl. unverbrannte Kohlenwasserstoffe) zurück. Außerdem wird Kohlenstoffdioxid CO_2 als Verbrennungsprodukt gebildet.

Eine Verminderung des CO_2 -Ausstoßes ist aufgrund der direkten Kopplung mit der eingesetzten Brennstoffmasse ausschließlich durch die Erhöhung des Gesamtwirkungsgrades des Energieumwandlungsprozesses möglich. Währenddessen kann die Entstehung der übrigen genannten Schadstoffe durch Maßnahmen in Bezug auf die Verbrennungsführung sowie die Qualität der Gemischaufbereitung beeinflusst werden. Die hohe Komplexität der individuellen Entstehungsvorgänge und deren Abhängigkeiten von Druck, Temperatur, Strömungs-

geschwindigkeiten, Brennstoff-Luft-Verhältnis, Stoffeigenschaften und sonstigen Wechselwirkungen in der auftretenden Zweiphasenströmung lassen die Formulierung einer für alle Anwendungsarten gültigen Reduzierungsstrategie nicht zu [1].

Die umgebenden Wände von Brenn- bzw. Mischraum haben einen maßgeblichen Einfluss auf die Qualität der Gemischaufbereitung. Der eingebrachte flüssige Brennstoff gelangt teilweise auf die Wände, meist in Tropfenform. Tropfen-Wand-Interaktionen bestimmen den Charakter und die Ausprägung des entstehenden Wandfilmes. Die resultierenden lokalen Erhöhungen der Brennstoffkonzentration sind als eine Ursache für unvollständig ablaufende Verbrennungsreaktionen in diesen Bereichen bekannt, wodurch die Bildung diverser Schadstoffe begünstigt wird [2].

1.2 Technischer Hintergrund und Ziel der Arbeit

Die Entwicklung von neuartigen Brennerkonzepten am DLR-Institut für Verbrennungstechnik (VT) in Stuttgart stellt den technischen Hintergrund der vorliegenden Masterarbeit dar. Im Rahmen von Entwicklungstätigkeiten an einem Brennerkonzept ist für zukünftige Projekte die Untersuchung der Dicke von Brennstofffilmen auf Teilen der Mischstrecke vorgesehen.

Bei dem betreffenden Brennersystem handelt es sich um den in Abbildung 1.1 dargestellten Einzeldüsen-FLOX[®]-Brenner. Diese pilotierte Einzeldüse ist ein generischer Ausschnitt zur Komponentenentwicklung aus einem Mehrdüsen-FLOX[®]-Brenner, der als neues innovatives Brennerkonzept in Gasturbinen unterschiedlicher Größe zum Einsatz kommen soll [3]. Als Brennstoff kann u. a. extra leichtes Heizöl (HEL) verwendet werden. Der beispielsweise im Zentrum des Rohrquerschnittes positionierte Injektor wird von vorgewärmter Luft umströmt, die Temperaturen von bis zu 600 °C erreicht. Auf diese Weise soll eine gute Durchmischung von Gas und Fluid erzielt werden, sodass unmittelbar vor der Zündung ein homogenes gasförmiges Brennstoff-Luft-Gemisch vorliegt.

In der Mischstrecke kommt es zum Stoffaustausch bzw. zu Mischungsvorgängen zwischen den verschiedenen Phasen der Strömung. Die aufgrund der hohen Temperaturen erfolgende Verdampfung des Brennstoffes wird experimentellen Beobachtungen zufolge nicht vollständig abgeschlossen. Ein Teil bleibt in flüssiger Form auf den Innenwänden zurück und wird entlang dieser in Richtung der Brennkammer transportiert, getrieben durch die Gasströmung im Inneren des Rohres. Das Ende der Mischstrecke stellt gleichzeitig den Eintritt in die Brennkammer dar, bei dem sich nach der Zündung des Gemisches eine Flamme ausbildet. Lokal erhöhte Brennstoffkonzentrationen in Form flüssiger Ablagerungen an den Wänden beeinflussen die Qualität der Gemischbildung negativ und verursachen eine erhöhte Schadstoffbildung während der Verbrennung. Aus diesem Grund sollen die Wandfilme im Inneren des Mischrohres genauer untersucht werden.

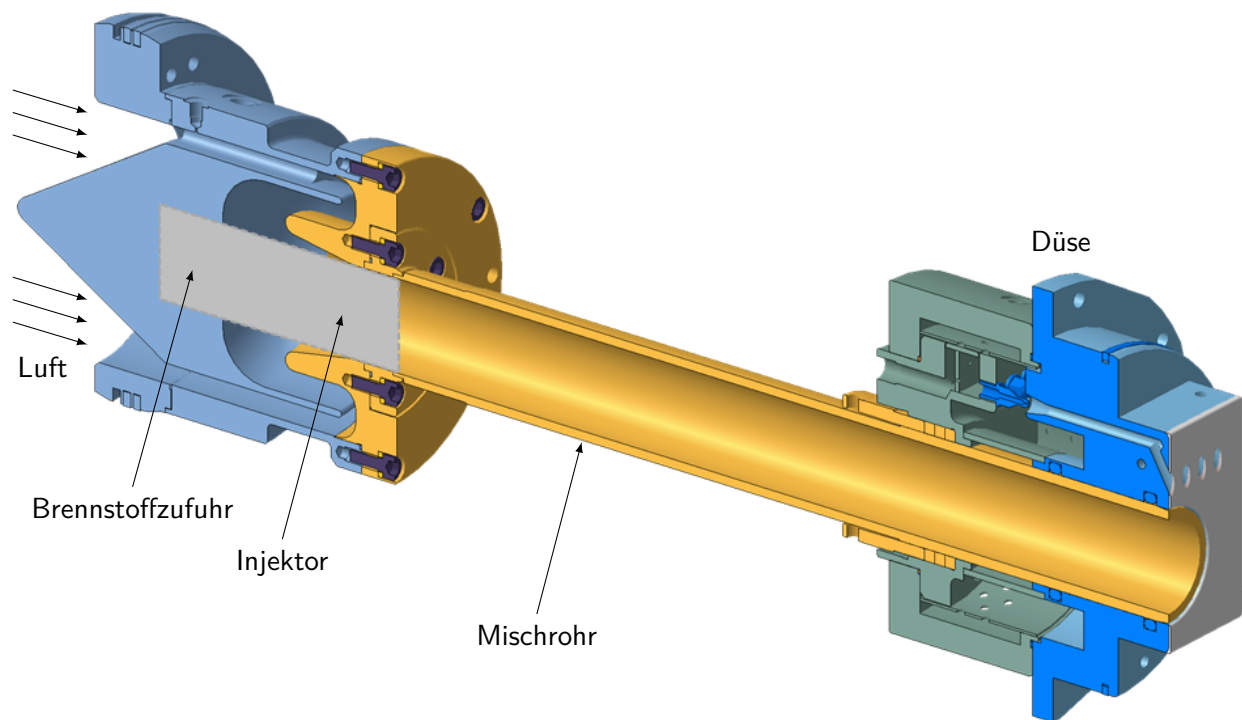


Abbildung 1.1: Längsschnitt eines Einzeldüsen-FLOX®-Brenners

Um komplexe optische und laserdiagnostische Messtechniken mit definierten Randbedingungen anwenden zu können, wurde für den Hochdruckbrennkammer-Prüfstand Stuttgart (HBK-S) eigens ein entsprechender Versuchsträger entwickelt. Während im realen Mehrdüsen-FLOX®-Brennersystem 20 ringförmig angeordnete Düsen gleichzeitig zum Einsatz kommen, beschränken sich die Untersuchungen am HBK-S auf den genannten Einzeldüsen-FLOX®-Brenner als Ausschnitt des vollen Systems. Zur Schaffung eines optischen Zuganges in den Bereichen mit Wandfilmbildung werden Edelstahl-Komponenten durch transparentes Material ersetzt, falls notwendig. Ein weiterer Unterschied besteht in der Verwendung einer planaren Wandgeometrie, erzeugt durch die gedankliche Abwicklung der Innenseite des ursprünglich runden Mischrohrs. Die übrigen Randbedingungen wie etwa Druck, Temperatur und Strömungsgeschwindigkeiten bewegen sich in sehr ähnlichen Bereichen wie beim Original-Brennersystem mit mehreren Düsen. Das Hochdruckexperiment am HBK-S stellt demnach einen Modellversuch an einem generischen Einzelbrenner unter realistischen Bedingungen dar.

Zur Auswahl einer geeigneten Methode zur Filmdickenbestimmung werden Voruntersuchungen durchgeführt. Diese Masterarbeit stellt einen Zwischenschritt dar, um die zukünftig geplante Integration der Messtechnik in die Versuchsumgebung am HBK-S zu unterstützen. Ziel der Arbeit ist die Recherche und Bewertung unterschiedlicher Messverfahren zur Bestimmung von Filmdicken. Eine Erprobung von zwei Verfahren anhand eines vereinfachten Strömungsprüfstandes mit generischem Wandfilmerzeuger ist ebenfalls Bestandteil der Untersuchungen. Die gewählte Messtechnik wird unter Laborbedingungen getestet. Als Ergebnis werden auf Basis der experimentellen Daten Empfehlungen hinsichtlich der weiteren Vorgehensweise zum Einsatz im Hochdruckversuch am HBK-S abgeleitet.

Diese Masterarbeit ist in fünf Kapitel unterteilt. Nachdem mit Kapitel 1 die Vorstellung und Einordnung des Themas abgeschlossen ist, geht Kapitel 2 näher auf die Grundlagen von Wandfilmströmungen in technischen Systemen ein. Insbesondere wird die Entstehung von Wandfilmen durch Tropfen-Wandinteraktion sowie die Dynamik von dünnen schubspannungsgetriebenen Fluidfilmen behandelt. Ein Überblick über die verschiedenen Verfahren zur Bestimmung der Dicke von Flüssigkeitsfilmen ist als Literaturstudie in Kapitel 3 zusammengestellt. Die gesammelten Daten und Informationen bilden anschließend die Grundlage für eine Vorauswahl geeigneter Methoden zur Erprobung an einem Strömungsprüfstand unter vereinfachten Laborbedingungen. Kapitel 4 beschreibt die Auswahl der Messtechnik, den Versuchsaufbau und die Durchführung sowie die Auswertung der aufgenommenen Messdaten, aus der sich ein Urteil über die Eignung der untersuchten Messmethoden ergibt. In Kapitel 5 werden die Ergebnisse der vorliegenden Masterarbeit zusammengefasst und diskutiert. Ausgehend von den gewonnenen Erkenntnissen werden Empfehlungen für zukünftige Untersuchungen abgeleitet.

2 Grundlagen der Wandfilmströmungen

2.1 Relevanz in technischen Systemen

Flüssige Wandfilme treten in zahlreichen technischen Systemen auf. Einige Anwendungen basieren auf der kontrollierten Erzeugung eines Filmes, um einen bestimmten Effekt zu erzielen. In anderen Bereichen ist die Ausbildung eines Wandfilmes mit negativen Auswirkungen verbunden und daher unerwünscht.

Mögliche treibende Kräfte für die Entstehung einer Wandfilmströmung werden im Wesentlichen entweder durch Gravitation verursacht oder durch die Schubspannung an der Phasengrenze zu einer über dem Film strömenden Gasphase übertragen. In sog. Fall- oder Rieselfilmen überwiegt der Schwerkrafteinfluss der im Film gespeicherten Fluidmasse. Wandfilme, bei denen die Einwirkung äußerer Kräfte aufgrund einer treibenden Gasströmung dominiert, werden unter der Bezeichnung schubspannungsgetriebene Wandfilme zusammengefasst [4].

In Prozessen der chemischen Verfahrenstechnik und im Maschinenbau sind vorwiegend Fall- bzw. Rieselfilme anzutreffen [5, 6]. In luftfahrtbezogenen Anwendungsbereichen sind häufig schubspannungsgetriebene Wandfilme von Interesse, so beispielsweise die Strömung von Flüssigkeiten auf schnell rotierenden Scheiben in Triebwerkslagerkammern [7] sowie im nachfolgenden Sekundärluftsystem [8] oder in Filmverdampfungsbrennkammern [4] und luftgestützten Brennstoffzerstäubern [9]. Auch für speziellere Anwendungen wie die Erzeugung von Metallpulvern durch die Rotationszerstäubung flüssiger Metallschmelze sind Wandfilme relevant [10]. Besonders komplexe Wandfilmströmungen können durch die Überlagerung der genannten Phänomene Gravitation und Scherung an Phasengrenzflächen mit einem zusätzlichen Impulseintrag aufgrund einschlagender Tropfen zustande kommen [11].

Eine umfangreiche Vorstellung und Beschreibung der verschiedenen Arten von Flüssigkeitszerstäubern ist in [9] zu finden. Im Folgenden soll zur Veranschaulichung der Typ luftgestützter Zerstäuber näher betrachtet werden. Die Bildung eines Wandfilmes wird dabei gezielt genutzt, um eine Oberflächenvergrößerung des eingespritzten Fluids herbeizuführen, bevor dieses eine Zerstäuberkannte erreicht. Durch hohe Temperaturen an den Wänden wird der Brennstoff gleichzeitig erwärmt und so dessen Verdampfung beschleunigt bzw. ermöglicht. Die Entstehungsweise des Wandfilmes bei luftgestützten Zerstäubern ähnelt der im

FLOX[®]-Mischrohr. Bei letzterem stellt die Bildung eines Flüssigkeitsfilmes jedoch einen unerwünschten Nebeneffekt der Gemischbildung dar und verursacht typischerweise negative Auswirkungen, vgl. Abschnitt 1.2.

Unterschiedliche Bauformen luftgestützter Brennstoffzerstäuber kommen beispielsweise in Fluggasturbinen oder Ottomotoren zum Einsatz. So zeigt Abbildung 2.1 das Konzept des im Turbofan-Triebwerk Rolls-Royce Trent 1000 eingesetzten Airblast-Zerstäubers. Durch die Erzeugung eines feinen Sprays wird die gewünschte Durchmischung von Brennstoff und Luft in der Brennkammer sichergestellt.

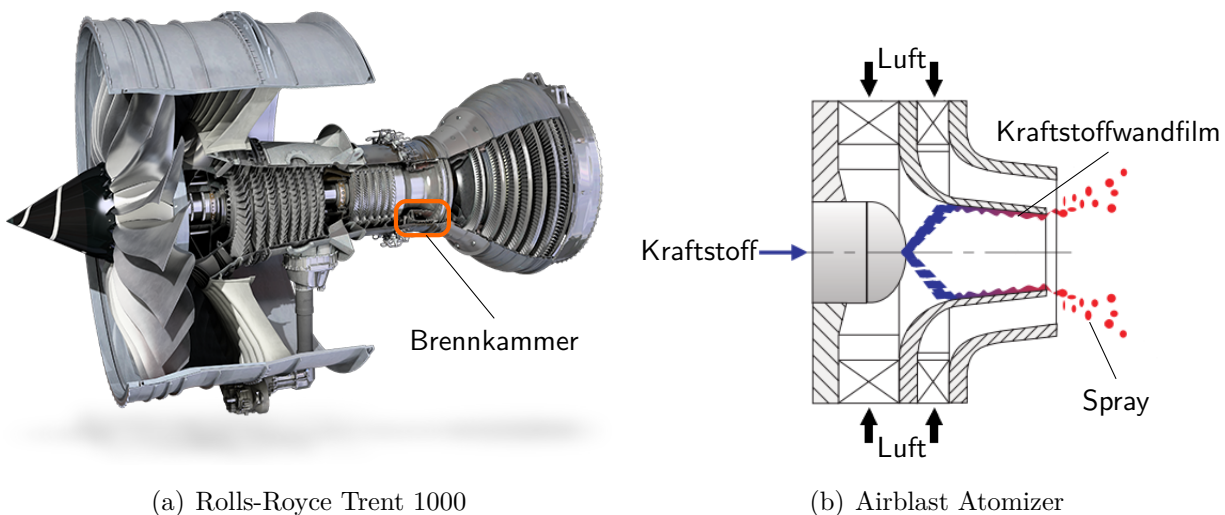


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung eines Airblast-Zerstäubers (b), eingesetzt in der Brennkammer des Turbofan-Triebwerkes Rolls-Royce Trent 1000 (a), © Rolls-Royce 2006, nach [4]

In Ottomotoren mit Saugrohreinspritzung tritt luftgestützte Zerstäubung in ähnlicher Form auf, siehe Abbildung 2.2. Die Brennstofftropfen in dem von der Einspritzdüse erzeugten Spray bilden einen Film auf den Wänden des Ansaugtraktes. Verschiedene Effekte wie Tropfenverdunstung, -abriss oder -reflexion haben dabei entscheidenden Einfluss auf die Kraftstoffmenge, die den Eintrittsbereich zum Zylinder in flüssiger Form erreicht [1,2]. Beim Öffnen des Einlassventils kommt es unter Nutzung der Strömungsenergie der angesaugten Luft im Ventilspalt zur Zerstäubung des Wandfilmes [9]. Im Brennraum erfolgt die Zündung des auf diese Weise bereitgestellten Kraftstoffsprays.

Bei einem Kaltstart des Motors herrschen niedrige Temperaturen an den Wänden des Ansaugtraktes, sodass eine Verdampfung von Kraftstoff aus dem Wandfilm heraus nicht oder nur in geringem Ausmaß stattfindet. Im Vergleich zu einem Warmstart oder Betrieb im aufgewärmten Zustand ist die gespeicherte flüssige Kraftstoffmenge im Wandfilm gegenüber des Injektors besonders groß. Dies hat einen erheblichen negativen Einfluss auf die nachfolgende Gemischbildung unmittelbar vor der Zündung und führt zu deutlich erhöhten Schadstoffemissionen in der Kaltstartphase eines Ottomotors mit Saugrohreinspritzung [12–15].

Die Bildung eines Kraftstofffilmes auf den Wänden des Brennraumes ist mit mehreren negativen Effekten verbunden. Die Flüssigkeit im Wandfilm entzieht ihrer Umgebung Wärme. Solange es dadurch nicht zur Verdampfung des flüssigen Brennstoffes kommt, kann dieser

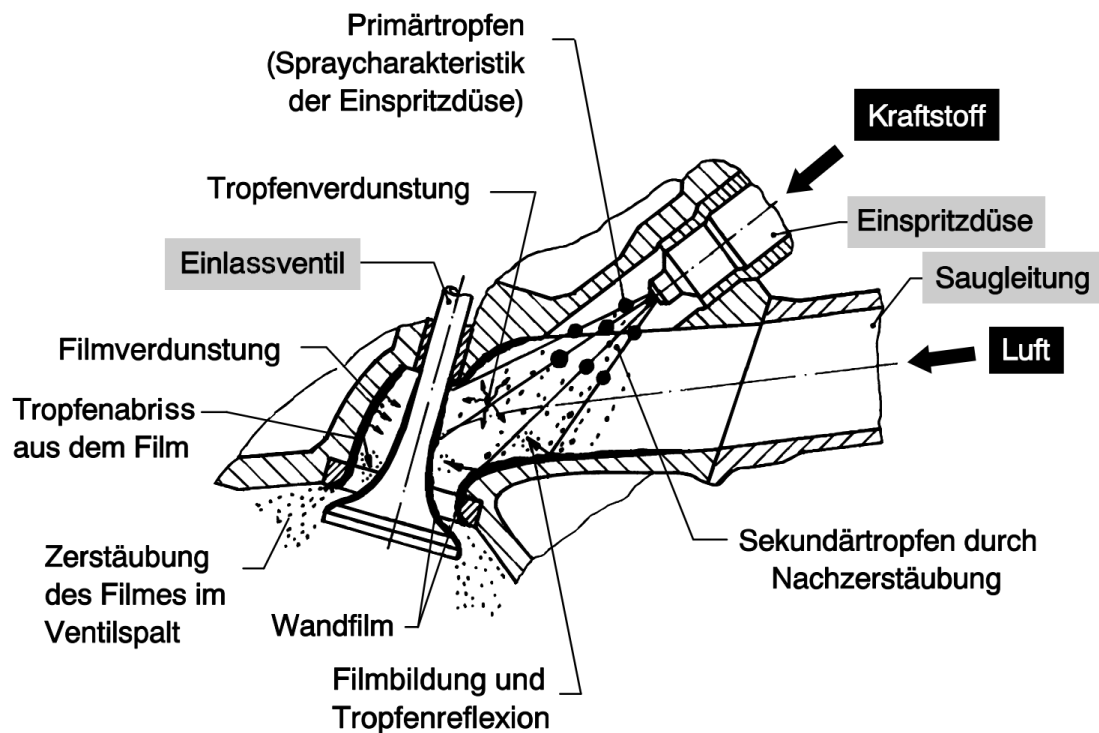


Abbildung 2.2: Physikalische Effekte bei der Gemischaufbereitung im Ansaugtrakt eines Ottomotors [2]

nicht an der Verbrennungsreaktion teilnehmen und bleibt unverbrannt zurück. Zusätzlich führt ein absinkendes Temperaturniveau im Zylinder von Hubkolbenmotoren zu einer Erhöhung der Schadstoffproduktion bei der Verbrennung. Um die Entstehung fetter Zonen mit lokal erhöhter Brennstoffkonzentration zu vermeiden, ist die Benetzung der Wände des Brennraumes durch das gebildete Spray unerwünscht [1].

In Dieselmotoren mit SCR-Systemen (selective catalytic reduction, engl. selektive katalytische Reduktion) zur Abgasnachbehandlung beeinflussen Wandfilme die ablaufenden Reaktionen und haben folglich Auswirkungen auf den erzielten Wirkungsgrad. Zur Senkung der NO_x -Emissionen werden wässrige Harnstofflösungen in das Abgas eingespritzt, die eine Umwandlung in Ammoniak NH_3 bewirken. Ansammlungen von Reduktionsmittel in Form von Fluidfilmen an den Wänden sind für den Prozess nur eingeschränkt nutzbar [16].

Ein umfassendes Verständnis von Wandfilmen in technischen Systemen – teilweise als unerwünschter Nebeneffekt, teilweise absichtlich erzeugt – bietet eine effektive Ansatzmöglichkeit für Verbesserungen. Eine gezielte Kontrolle der Filmbildung stellt den zentralen Aspekt bei der Optimierung der Effizienz von Verbrennungskraftmaschinen dar. Durch die Steigerung der Gemischaufbereitungsqualität wird die Verminderung der Schadstoffproduktion beim Ablauf von Verbrennungsreaktionen ermöglicht. Die Auslegung von Zerstäubern zur Erzielung einer gleichmäßigen monodispersen Verteilung möglichst feiner Brennstofftröpfchen mit definierter Ausbreitungsrichtung steht dabei als typisches Anwendungsfeld im Vordergrund [9].

2.2 Entstehung von flüssigen Wandfilmen

Entsprechend der großen technischen Bedeutung existiert sowohl eine große Anzahl anwendungsbezogener als auch grundlagenorientierter Untersuchungen über die Entstehung von flüssigen Wandfilmen. Die Geschichte reicht dabei zurück bis in das Jahr 1876, als die ersten photographischen Aufnahmen und Schlussfolgerungen zum ablaufenden Zerfall beim Aufprall von Tropfen auf eine Wand entstanden [17, 18].

Ausgehend vom technischen Hintergrund der vorliegenden Masterarbeit wird im Folgenden der Fokus auf die Bildung von flüssigen Wandfilmen durch verschiedene Arten der Tropfen-Wandinteraktion gelegt. Die umfassenden und detaillierten Arbeiten [1, 2, 19, 20] dienen als Grundlage für den folgenden kurzen Überblick. An den entsprechenden Stellen verdeutlichen Verweise auf weiterführende Literatur den enormen Umfang an verfügbarem wissenschaftlichem Material.

2.2.1 Interaktionsmechanismen

Die drei grundlegenden Wechselwirkungsarten beim Tropfenaufprall sind Reflexion, Koaleszenz und Destruktion. Diese Einteilung wird anhand der Aufprallprodukte vorgenommen und wurde bereits sehr früh in der Forschung beschrieben. Prallt der gesamte Tropfen von der Wand zurück, liegt Reflexion vor. Bei Koaleszenz kommt es zur vollständigen Ablagerung des Tropfens an der Wand. Der etwas komplexere Interaktionsmechanismus der Destruktion ist gekennzeichnet durch die Bildung sog. Tochtertropfen während des Aufpralles. Zahlreiche weiterführende Literatur zu Interaktionsmechanismen beim Tropfenaufprall verschiedener Medien auf Flüssigkeitsfilmen sowie beheizten Wandoberflächen wird in den umfassenden Übersichten [21, 22] vorgestellt.

Die Benetzung der Wand bereits vor dem Aufprall des Tropfens hat einen erheblichen Einfluss auf die ablaufenden Aufprall- bzw. Interaktionsvorgänge. Dieses Szenario ist insbesondere während der Gemischbildung mithilfe eines Flüssigkeitsinjektors relevant, weil dort typischerweise ein Aufprall von Sprays aus feinen Tropfen auf benetzte Wände stattfindet. Je nach Autor werden anhand des Verhältnisses der vorhandenen Filmdicke zum Tropfendurchmesser (dimensionslose Filmdicke $h^* = \delta/D_T$) verschiedene Kategorien und Übergangsbereiche unterschieden, vgl. [21, 23–25]. Eine Übersicht der charakteristischen Interaktionsarten beim Aufprall eines Tropfens auf eine Flüssigkeitsoberfläche ist in Abbildung 2.3 dargestellt.

Tropfenreflexion. Besitzt der Tropfen beim Aufprall auf eine benetzte Wand einen niedrigen Impuls, dann bildet sich zwischen Wandfilm und auftreffendem Tropfen ein Polster, bestehend aus verdunsteter Flüssigkeit oder Umgebungsluft. Auf unbenetzten Wänden mit Temperaturen oberhalb der sog. LEIDENFROST-Temperatur der Flüssigkeit bildet sich analog dazu eine Schicht aus verdampftem Fluid, was als LEIDENFROST-Phänomen bezeichnet wird [26–28]. Dadurch kommt während des gesamten Aufprallvorganges kein direkter Kontakt zustande [29]. Aufgrund der abrupten Verzögerung werden die Oberflächen von Trop-

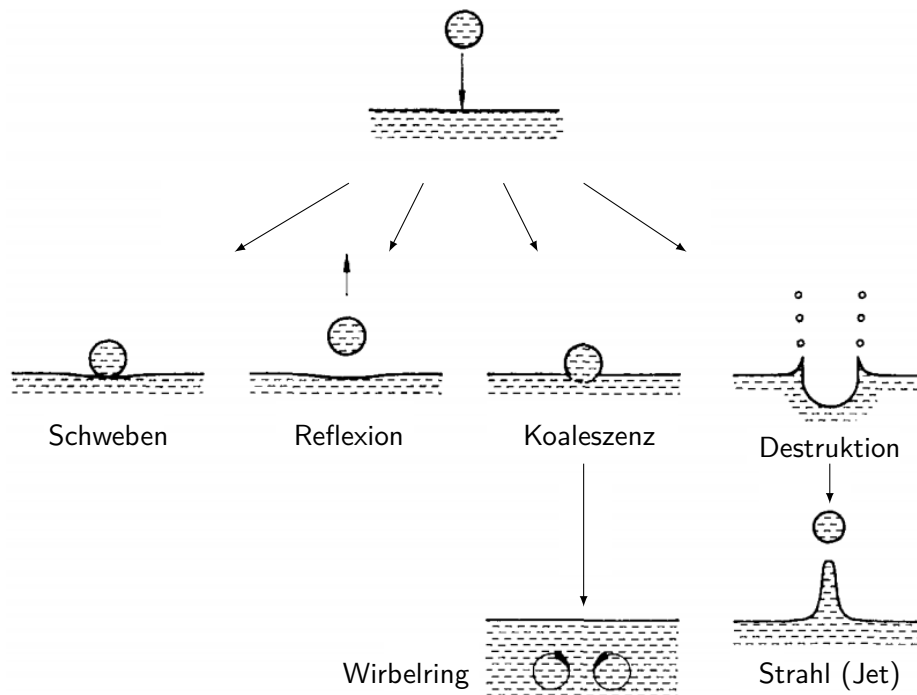


Abbildung 2.3: Übersicht charakteristischer Interaktionsarten eines Tropfens beim Aufprall auf eine Flüssigkeitsoberfläche, nach [19]

fen und Film jeweils stark deformiert. Die Oberflächenkräfte wirken auf eine Flächenminimierung der Flüssigkeiten hin und verursachen auf diese Weise eine Rückstellkraft. Unter bestimmten Umständen kann ein kurzweiliges Schweben des Tropfens auf der Oberfläche auftreten [30]. Reflexion liegt vor, wenn der Tropfen wieder vom Wandfilm abhebt. Sie kann als teilelastischer Stoß unter Dissipation eines wesentlichen Anteiles der kinetischen Energie des Tropfens betrachtet werden. Beim senkrechten Aufprall beträgt dieser bis zu 95 % der eingebrachten Energie. Mit abnehmendem Auftreffwinkel (Winkel zwischen Wandoberfläche und Bewegungsrichtung des Tropfens) wird weniger Energie dissipiert.

Reflexionsvorgänge, bei denen sich der auftreffende Tropfen nach dem Aufprall wie in Abbildung 2.4 nicht mehr vollständig von der Oberfläche löst, werden als partielle Tropfenreflexion bezeichnet. Als Sonderform der Reflexion ist diese im Grenz- bzw. Übergangsbereich zur Koaleszenz einzuordnen. Tropfen- und Filmoberfläche werden jeweils deformiert und es kommt im Gegensatz zur vollständigen Tropfenreflexion stellenweise zur Verbindung zwischen Tropfen- und Wandfilmmasse [31]. Ein kleinerer Teil des Tropfens hebt aufgrund der Oszillation wieder vom Film ab während ein größerer filmzugewandter Tropfenanteil durch seine bestehende Verbindung zurückbleibt und vom Film aufgenommen wird. Die reflektierte und dadurch abgespaltene Tropfenmasse verlässt die Aufprallstelle. Die verringerte Geschwindigkeit solcher Sekundärtropfen verdeutlicht, dass ein Großteil der eingebrachten Energie des Tropfens bei einer partiellen Tropfenreflexion im Wandfilm dissipiert wird.

Tropfenkoaleszenz. Erfolgt sowohl eine vollständige Aufnahme der Masse des ankommenden Tropfens als auch die Umsetzung der gesamten eingebrachten Energie im vorhandenen Wandfilm, liegt Koaleszenz vor. Im Verlauf des Tropfenaufpralles bildet sich ein charakteristi-

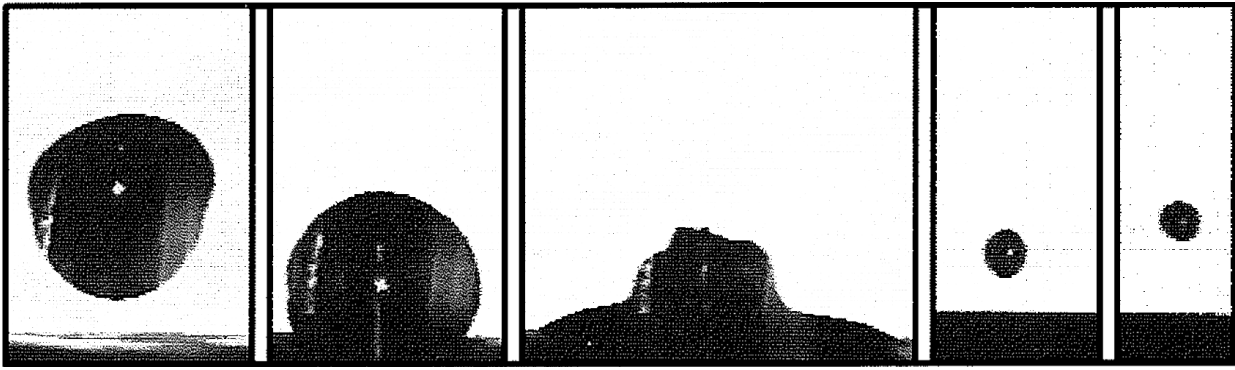


Abbildung 2.4: Partielle Tropfenreflexion an einer benetzten Wand, $\delta = 2,0$ mm, Tropfen mit $D_T = 3,6$ mm und $v_T = 0,58$ m/s, senkrechter Tropfenaufprall $\alpha = 90^\circ$, Medium: Wasser [1]

scher Krater in der Oberfläche sowie ein Wirbelring unterhalb der Aufprallstelle im Wandfilm aus [19]. Bei höherem Impulseintrag entsteht darauffolgend eine aufsteigende Flüssigkeitslamelle. Durch die Oberflächenkräfte kommt es jedoch noch nicht zum Tropfenabriss aus dem Film und der Krater ist durch die Rückstellkräfte der Oberflächenspannung bereits nach kurzer Zeit zurückgebildet. Die örtliche Rückwirkung auf das Verhalten der Wandfilmströmung zeigt sich insbesondere beim Einschlagen großer Tropfenmassen, was typisch für den Wandaufprall von Sprays ist.

Tropfendestruktion. Bei einem ausreichend hohen Impuls verursacht der aufschlagende Tropfen beim Kontakt mit der Filmoberfläche kurzzeitig derart hohe Drücke, dass die Flüssigkeit in diesem Bereich ausweicht. In der Folge bildet sich eine Lamelle zwischen Tropfen und Wandfilm aus, die sich radial mit einer Geschwindigkeit ausbreitet, die aufgrund der Kontinuitätsbedingung ein Vielfaches der Aufprallgeschwindigkeit des Originaltropfens betragen kann. Dabei beginnt die Lamelle unverzüglich mit der Abgabe erster sehr kleiner Sekundärtropfen [32].

Die Betrachtung des weiteren Verlaufes zeigt das Eintauchen der ankommenden Tropfenmasse in den Wandfilm. In tiefen Filmen ist genug Raum für eine Verdrängungsreaktion vorhanden. Im Gegensatz zu flachen Filmen kommt es hier nicht zu einem Durchschlagen des Tropfens bis zur Wandoberfläche. Bei Filmdicken im Bereich des Originaltropfendurchmessers erfolgt eine Umlenkung durch die Wand, an der die Tropfenmasse in radiale Richtung ausweicht. Die sich fortan entlang der Wand ausbreitende Flüssigkeitsfront erfährt mit steigendem Verdrängungsradius zunehmende Rückstellkräfte des umgebenden Wandfilmes und wird zur Gasphase hin abgelenkt. Mithilfe der verbleibenden kinetischen Energie bildet sich dabei eine Lamellenstruktur aus, an deren oberen Rand sich Flüssigkeit in Form eines Ringes ansammelt.

Bereits zu Beginn der Ringbildung treten über den Umfang unterschiedliche Massenverteilungen auf, verursacht durch Kapillar- und Trägheitskräfte. In der Lamelle treten Kapillarwellen auf, die für ein Zusammenballen der Ringmasse verantwortlich sind [33]. Massenanhäufungen bewegen sich weiter nach außen als der Rest der Lamelle, woraufhin sich mehrere Flüssigkeitsstege ausbilden. Die Stege sind jeweils am unteren Ende mit der Lamelle verbunden. Am

oberen Ende werden Sekundärtropfen abgegeben, die sowohl aus der Flüssigkeit des Originaltropfens als auch einem kleinen Anteil des Wandfilmes zusammengesetzt sind. Der Abgang von Wandfilmanteilen in Form von Tropfenfragmenten wird eingehend in [1, 34] untersucht.

In Abbildung 2.5 ist der typische Ablauf einer Tropfendestruktion bei senkrechtem Aufprall auf eine benetzte Wand dargestellt. Die Dicke des vorhandenen Wandfilmes liegt dabei deutlich unterhalb des Tropfendurchmessers. Bei solchen flachen Filmen ist die zur Verdrängung benötigte Energie gering, sodass viele Sekundärtropfen von der Lamelle abgegeben werden. Die Ursache liegt darin, dass bei einem vorhandenen Film auf der Wand keine hohen Oberflächenkräfte zu deren erstmaliger Benetzung mehr überwunden werden müssen [1, 2, 35, 36].

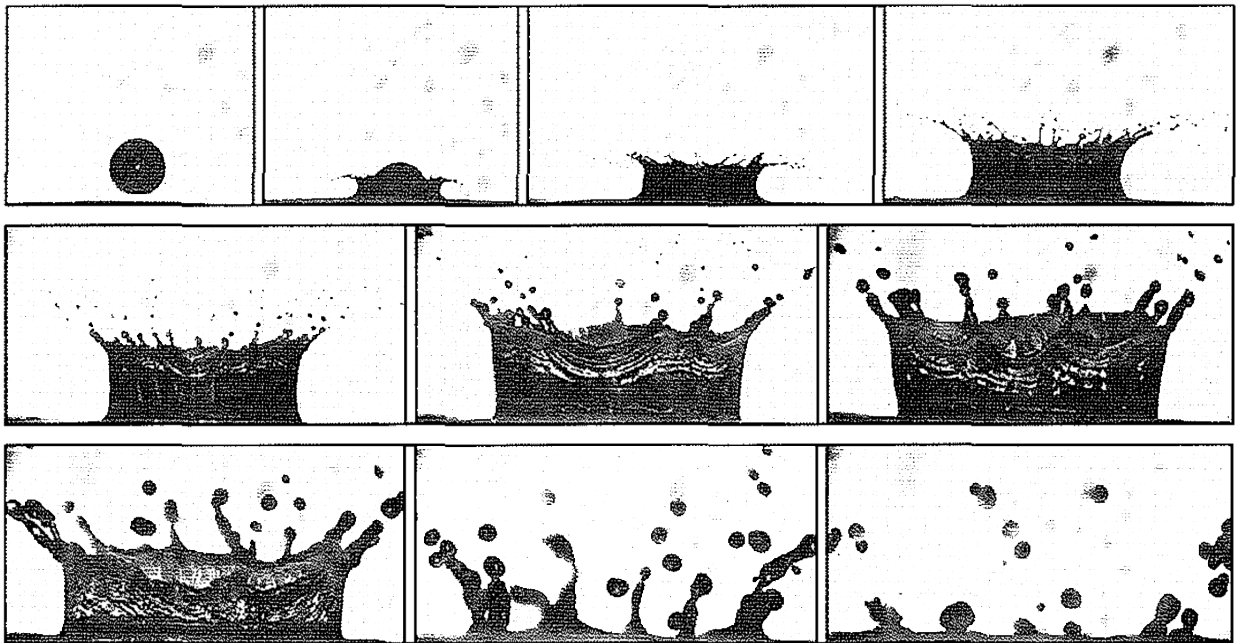


Abbildung 2.5: Tropfendestruktion an einer benetzten Wand, $\delta = 2,0$ mm, Tropfen mit $D_T = 3,6$ mm und $v_T = 2,68$ m/s, senkrechter Tropfenaufprall $\alpha = 90^\circ$, Medium: Wasser [1]

Liegt vor dem Aufprall eine Benetzung mit einem tiefen Wandfilm vor, dann kommt es zu Rückströmungseffekten im Anschluss an den Zerfall der Lamelle. Durch das Zusammentreffen der verursachten Ausgleichsströmungen wird im Interaktionszentrum die fehlende Masse wieder zugeführt. Die dabei mitgeführte kinetische Energie erzeugt einen sog. RAYLEIGH- oder WORTHINGTON-Jet, der in Richtung der Gasphase ausweicht. Diese dicke Flüssigkeitskeule konnte auch bereits bei Filmen mit $h^* \approx 1$ beobachtet werden. Meist werden wenige Tropfen abgegeben, die teilweise die Größe des Originaltropfens übertreffen können (Abbildung 2.6), was mit einer Reduzierung der Austrittsgeschwindigkeit einhergeht. Besteht die Wand aus superhydrophobem Material, können laut [37] sogar für einen Tropfenaufprall auf unbenetzten Oberflächen wie in Abbildung 2.7 ähnliche Phänomene beobachtet werden.

Bei flacheren Aufprallwinkeln beinhaltet der Impuls des ankommenden Tropfens zusätzlich zur wandnormalen eine Komponente in wandparalleler bzw. -tangentialer Richtung. Auf der stromabwärts befindlichen Seite wird insbesondere bei benetzten Oberflächen unmittelbar nach dem Auftreffen eine Lamellenbildung unterdrückt. Diese beschränkt sich auf den strom-



Abbildung 2.6: Abgabe eines großen Sekundärtropfens durch einen RAYLEIGH- bzw. WORTHINGTON-Jet bei Aufprall eines Wassertropfens auf die Oberfläche eines tiefen Wasserfilmes [38]

aufwärts befindlichen Bereich, wo eine starke Umlenkung durch die Umwandlung von kinetischer Energie stattfindet. Diese steht anschließend nicht mehr für die Abgabe von Tropfen zur Verfügung, weshalb aus der Lamelle nur wenige Sekundärtropfen austreten können. Das Verhältnis zwischen Normal- und Tangentialgeschwindigkeit bestimmt, welcher Anteil des eintreffenden Tropfens stromabwärts umgelenkt wird. Unter Ausbildung einer Bugwelle verdrängt dieser den vorhandenen Wandfilm [39]. Die nachfolgende Flüssigkeit wird durch den Einfluss der Bugwelle in Richtung der Gasphase abgelenkt und es entsteht eine deformierte Lamelle, die viele Sekundärtropfen abgibt.

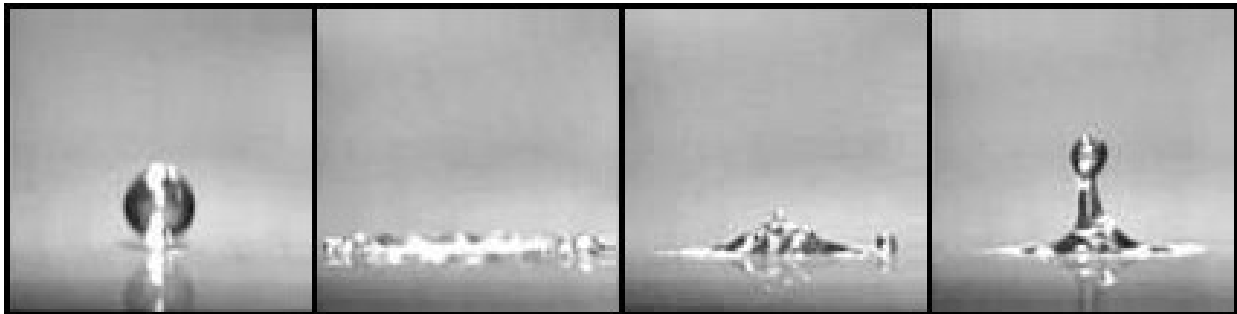


Abbildung 2.7: Aufprall eines Wassertropfens auf eine superhydrophobe Oberfläche: Tropfen zu Beginn des Aufprallvorganges, maximale radiale Ausdehnung, Strahlbildung, Aufsteigen des Strahles, nach [37]

2.2.2 Systematisierung komplexer Aufprallphänomene

Die Ausprägung der konkreten Interaktionsform beim Tropfenaufprall ist maßgeblich abhängig von den vorherrschenden Randbedingungen. Durch intensive Forschung wurden bereits zahlreiche Einflussgrößen identifiziert und deren Einfluss untersucht. Die Parameter werden dabei auf verschiedene Weise in Gruppen zusammengefasst [1, 2, 21, 40]. Die Einteilung nach [21] unterscheidet hauptsächlich in Parameter des Tropfens (Durchmesser, Geschwindigkeit, Aufprallwinkel, Temperatur, Dichte, Viskosität, Oberflächenspannung), des vorhandenen Wandfilmes (Dicke, Geschwindigkeit, Temperatur, Dichte, Viskosität, Oberflächen-

spannung, Zusammensetzung sowie Merkmale der darunter befindlichen Wandoberfläche) und der umgebenden Gasphase (Geschwindigkeit, Strömungsregime, Druck, Temperatur, Gaseigenschaften wie Dichte und Viskosität).

Die genannten Einflussgrößen werden in unterschiedlichen Kombinationen zu dimensionslosen Kennzahlen zusammengefasst [20,21]. Diese dienen zur Abgrenzung von Parameterbereichen, denen das Auftreten bestimmter Aufprall- bzw. Interaktionsmechanismen zugeordnet wird. Gleichzeitig kann durch dieses Vorgehen die Anzahl zu untersuchender Parameter reduziert und eine Übertragbarkeit auf andere Anwendungsfälle ermöglicht werden. Häufig verwendete Kennzahlen zur Charakterisierung von Tropfen und Aufprallvorgängen sind

$$\text{FROUDE-Zahl} \quad \text{Fr} = \frac{v^2}{g D}, \quad (2.1)$$

$$\text{REYNOLDS-Zahl} \quad \text{Re} = \frac{\rho v D}{\mu}, \quad (2.2)$$

$$\text{WEBER-Zahl} \quad \text{We} = \frac{\rho v^2 D}{\sigma} \text{ und} \quad (2.3)$$

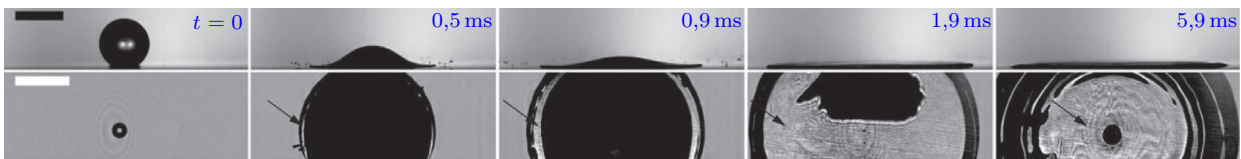
$$\text{OHNESORGE-Zahl} \quad \text{Oh} = \frac{\mu}{\sqrt{\rho \sigma D}} = \frac{\sqrt{\text{We}}}{\text{Re}}. \quad (2.4)$$

Die FROUDE-Zahl Fr beschreibt das Verhältnis von Trägheits- zu Schwerkraften und wird verwendet, um den Einfluss der Gravitation zu bemessen. Für das Turbulenzverhalten spielt die REYNOLDS-Zahl Re eine wichtige Rolle. Sie kann als Quotient von Trägheits- und Zähigkeitskräften verstanden werden, anhand dessen Aussagen über die Balance zwischen Impulskonvektion und -diffusion möglich sind. Die Zähigkeit des Fluides verursacht dämpfende Viskositätseffekte. Deren Einfluss auf die Tropfendeformation kann mithilfe der OHNESORGE-Zahl Oh charakterisiert werden. Die Reibungskräfte im Zähler stehen der Wurzel aus Trägheits- und Oberflächenkräften im Nenner gegenüber. Die Darstellung als Kombination aus REYNOLDS-Zahl Re und WEBER-Zahl We verdeutlicht, dass es sich um eine zusammengesetzte Kennzahl handelt. Unter Nutzung der WEBER-Zahl We kann das Verhältnis der Trägheits- zur Oberflächenkraft eines Tropfens spezifiziert werden. Bei der Beschreibung von Destruktionsvorgängen ist diese Kennzahl beispielsweise hilfreich, um eine Vergleichbarkeit der Versuchsbedingungen zu gewährleisten [41].

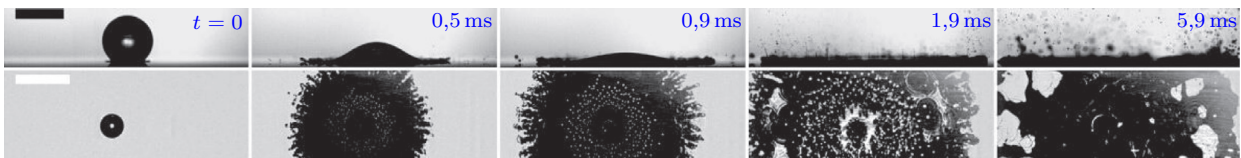
In den meisten technischen Systemen führt das Zusammenspiel vieler Einflussfaktoren zur Bildung eines Wandfilmes. In diesem Zusammenhang werden Nutzen und Potential der Einzeltropfenforschung von MOREIRA [42] kritisch diskutiert: Eine Untersuchung der jeweiligen Einzelphänomene unabhängig voneinander erreicht nicht den gewünschten Anspruch auf Allgemeingültigkeit und kann kaum verlässliche Vorhersagen für die Gesamtsituation im Anwendungsfall liefern. Im Bereich der Verbrennungsmotoren werden anhand der Spray-Wandinteraktion zahlreiche, teils kontroverse Forschungsergebnisse verglichen. Eine Einteilung der relevanten Phänomene wird vorgenommen, differenziert nach Aufprallenergie sowie Zeitskala. MOREIRA kommt zu dem Ergebnis, dass eine Systematisierung der auftretenden komplexen Interaktionen zwischen den einzelnen Auslegungsparametern und Betriebsbedingungen schwerfällt.

Hinsichtlich der Filmbildung durch Wandbenetzung nach Tropfenaufprall werden insbesondere im Zusammenhang mit beheizten Wänden die unterschiedlichsten Erscheinungsformen beschrieben [43]. In Abbildung 2.8 sind die Phänomene Spreitung (a), Blasensieden (b), Fingersieden (c) und LEIDENFROST-Effekt (d) für den Aufprall eines Ethanoltröpfens auf eine beheizte Wandoberfläche jeweils als Abfolge von Momentaufnahmen dargestellt. Bei ansonsten identischen Versuchsbedingungen kommt je nach Wandtemperatur ein qualitativ anderes Ergebnis zustande. Für ausreichend hohe Wandtemperaturen tritt der LEIDENFROST-Effekt auf, der eine Benetzung der Oberfläche verhindert, wie in der Unteransicht Abbildung 2.8 (d) zu sehen ist. Die in der Übersicht [22] eingehend beschriebene weiterführende Literatur zu diesem Thema beschäftigt sich u. a. mit verschiedenen Verfahren zur Bestimmung der LEIDENFROST-Temperatur T_L sowie der Analyse und Modellierung des Effektes für numerische Simulationen.

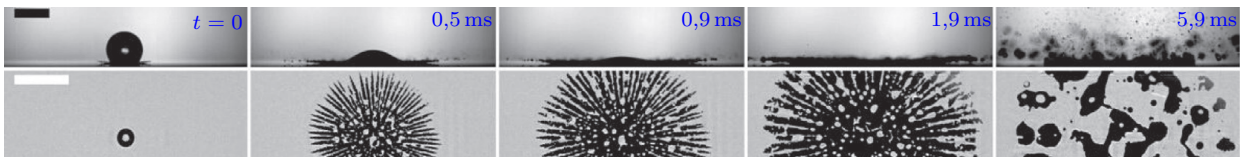
Aufgrund der typischerweise zu niedrigen Wandtemperaturen etwa in Gemischaufbereitungssystemen von Ottomotoren oder im Abgastrakt bei der SCR-Katalyse treten spezielle Phänomene wie der LEIDENFROST-Effekt dort nicht auf [2]. Hingegen liegen in Gasturbinen teilweise sehr heiße Wandoberflächen vor. Im Hinblick auf den technischen Hintergrund dieser Arbeit ist die Filmbildung durch das Auftreffen eines dichten Sprays aus Tropfen auf solche beheizten Wände von besonderer Relevanz.



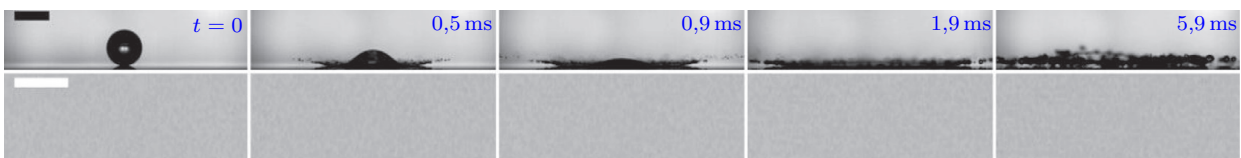
(a) $T_w = 60\text{ °C}$, Spreitung (spreading)



(b) $T_w = 180\text{ °C}$, Blasensieden (bubbly boiling)



(c) $T_w = 200\text{ °C}$, Fingersieden (fingering boiling)



(d) $T_w = 300\text{ °C}$, LEIDENFROST-Effekt

Abbildung 2.8: Aufprall eines Ethanoltröpfens auf eine beheizte Wand bei verschiedenen Wandtemperaturen T_w , $We = 481$, jeweils Seiten- und Unteransicht, Maßstabsbalken entsprechen 2 mm, nach [43]

SAMENFINK [1] trägt die Forschungsfortschritte in verschiedenen Bereichen zusammen: Für Experimente anhand freifallender Einzeltropfen mit großen Durchmessern und geringen Aufprallgeschwindigkeiten ergibt sich dabei keine Übertragbarkeit auf die Situation in Verbrennungskraftmaschinen oder unter gasturbinentypischen Randbedingungen. Untersuchungen an monodispersen Tropfenketten mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Aufprallwinkeln sowie kleinen schnellfliegenden Tropfen (Durchmesser ca. 50–300 μm) zeigen bereits gewisse Ähnlichkeit mit dem Charakter eines Sprühstrahles bzw. Sprays. Insbesondere bei erhöhter Folgefrequenz der Tropfen kann eine gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Aufprallvorgänge beobachtet werden. Diese ist folglich auch für Sprays nicht vernachlässigbar.

Der Sprayaufprall ist oft gekennzeichnet durch eine Konzentration vieler Tropfen auf eine relativ kleine Querschnittsfläche. Wenn es nicht zur vollständigen Reflexion aller Tropfen kommt, dann wird ein Teil der Tropfenflüssigkeit an der Wand angelagert. Die ankommende Flüssigkeit des Sprays breitet sich anschließend als dünne Schicht entlang der Wandoberfläche aus. Dabei können aufgrund des hohen Impulseintrages beim Aufprall Geschwindigkeiten in der Größenordnung der mittleren Aufprallgeschwindigkeit des Sprays erreicht werden. Trifft ein Spray auf einen bereits vorhandenen Wandfilm, so wird dieser verdrängt. Die Strömungsgeschwindigkeit in der sich bildenden Schicht verringert sich durch den Haftreibungseinfluss mit steigender radialer Entfernung vom Aufprallort [44]. In den Randbereichen der Verdrängungswirkung führt der Geschwindigkeitsabfall zu einem abrupten Ansteigen der Filmdicke, was als hydraulischer Sprung bezeichnet wird. Dieser kann in ähnlicher Form auch beobachtet werden, wenn vor dem Aufprall noch kein Wandfilm auf der Oberfläche vorhanden war. Die zusätzliche Überlagerung mit einer treibenden Gasströmung ruft weitere Effekte hervor. In Kombination mit bestimmten Aufprallwinkeln kommt es stromaufwärts zu Rückwirkungen auf die entstehende Wandfilmströmung. Auf diese Weise gebildete Flüssigkeitsansammlungen können infolgedessen ausschließlich quer zur Hauptströmungsrichtung abfließen [1].

2.3 Dynamik schubspannungsgetriebener Fluidfilme

Wie in den vorangegangenen Abschnitten erläutert, kann es als Ergebnis von Tropfen-Wandinteraktionen zur Anlagerung von Flüssigkeiten auf der Wandoberfläche kommen. Existiert eine darüber strömende Gasphase, so bildet sich darauffolgend eine Wandfilmströmung aus. An der Phasengrenzfläche wirken aufgrund von Schubspannungen beschleunigende Kräfte auf die Flüssigkeitsmasse, weshalb diese als schubspannungsgetriebener Film bezeichnet wird.

Da die Dynamik schubspannungsgetriebener Fluidfilme in direktem Zusammenhang mit der Entstehung von Wandfilmen steht, reicht die Geschichte der wissenschaftlichen Untersuchungen auf diesem Gebiet ähnlich lange zurück, vgl. Abschnitt 2.2. Insbesondere zur Bestimmung von Dicke und Oberflächengeschwindigkeit sowie zur Analyse und Modellierung des

Geschwindigkeitsprofilen innerhalb des Filmes sind zahlreiche Forschungsaktivitäten dokumentiert. Entsprechende Übersichten wurden durch ELSÄSSER [2] und SCHÖBER [4] zusammengestellt, letzterer mit Fokus auf numerischen Simulationen.

Verschiedene Ausprägungsformen schubspannungsgetriebener Wandfilme können abhängig von der Beladung des Filmes $\Lambda_f = \dot{V}_f/B$, der Geschwindigkeit der treibenden Gasströmung v_g sowie der Stoffeigenschaften der betreffenden Flüssigkeiten und Gase beobachtet und beschrieben werden [4]. In Abbildung 2.9 sind beispielhaft einige Wandfilme visualisiert. Während für niedrige Werte von Λ_f noch zweidimensionale Strukturen einzelner Wellen (a) zu erkennen sind, lösen sich diese mit steigender Beladung zunehmend auf (b) und gehen in eine stark dreidimensionale Oberflächenstruktur (c) über.

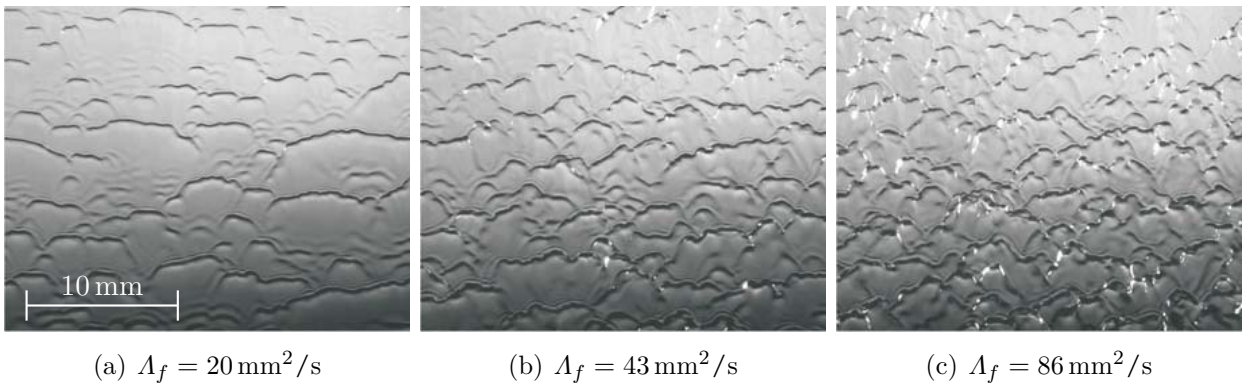


Abbildung 2.9: Visualisierung einer beschleunigten Filmströmung im atmosphärischen ebenen Versuchsaufbau, $v_g = 20 \text{ m/s}$, zweidimensionale Struktur einzelner Wellen (a), mit zunehmender Beladung (b) verstärkt dreidimensionale Oberflächenstruktur (c), nach [45]

WURZ [46] nahm im Jahr 1971 eine Einteilung anhand von mittlerer Filmhöhe und Gasgeschwindigkeit vor. Aufgrund der nicht vorhandenen Benetzung bei dünnen Wasserfilmen in Kombination mit schnellen Gasgeschwindigkeiten ist darin kein Gebiet verzeichnet, in dem einzelne Wellen auftreten. Erst in späteren Untersuchungen [47] konnte dieser Bereich beschrieben werden, wie Abbildung 2.10 zeigt. Das darin abgebildete Stabilitätsdiagramm bezieht sich auf Mischungen von Wasser und Glycerin, die eine deutlich höhere Viskosität und Benetzungsfähigkeit im Vergleich zu reinem Wasser aufweisen. Die drei in Abbildung 2.9 dargestellten Strömungsausschnitte sind darin schematisch positioniert [4].

Die Werte der REYNOLDS-Zahlen können sich während des Betriebes von technischen Systemen im Bereich mehrerer Größenordnungen verändern, sowohl in Bezug auf den Wandfilm als auch auf die treibende Luftströmung. In Abhängigkeit davon werden verschiedenartige Wellenstrukturen ausgebildet, die wiederum eine entsprechend unterschiedliche Rückwirkung auf die Gasphase verursachen. Diese bewegt meist sich mit deutlich höherer Geschwindigkeit als der Film, sodass die Filmoberfläche mit einer rauhen Wand verglichen werden kann [2]. Die Dynamik des Filmtransportes wird dadurch ebenfalls maßgeblich beeinflusst. Eine reine Extrapolation von bekannten Kurvenverläufen führt im Allgemeinen zu grundsätzlich falschen Ergebnissen. Dem kann nur mithilfe vergleichender und validierender Experimente unter anwendungsnahen Randbedingungen entgegengewirkt werden [4].

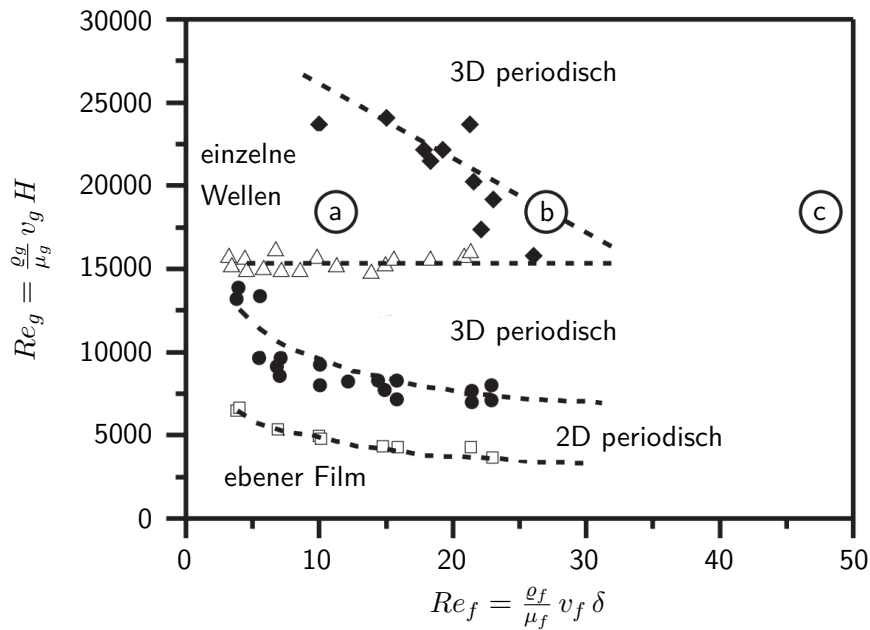


Abbildung 2.10: Stabilitätsdiagramm für verschiedene Mischungen von Wasser und Glyzerin, Viskosität 14–20 mPa s, Strömungskanalhöhe H , Annahme: Film mit Blockprofil mittlerer Höhe δ , nach [47]

Ausgangspunkt bei der Vorhersage bzw. Berechnung von Filmen mithilfe von numerischen Modellierungsansätzen ist häufig das Vorherrschen einer stabilen Filmströmung. Die daraus abgeleitete Annahme einer konstanten Filmbeladung Λ_f über die gesamte Lauflänge hinweg impliziert, dass die im Film gespeicherte Masse sich zeitlich nicht verändert. Wenn jedoch bei konstanter Beladung die Gasgeschwindigkeit über einen kritischen Wert hinaus erhöht wird, dann kommt es zur Abgabe von Fluidfragmenten aus dem Film in die Gasphase. Filmströmungen werden als überkritisch bezeichnet, sobald der Masseverlust durch Tropfenabriss nicht mehr vernachlässigbar gering ist. Bereits aus der Formulierung dieser Definition kann auf Schwierigkeiten hinsichtlich einer genauen Grenze geschlossen werden [4]. Einige Autoren beschränken sich auf die Beobachtung durch den Experimentator, andere legen mithilfe einer Massenbilanz nach Absaugung der Filmflüssigkeit den Übergangspunkt in eine überkritische Filmströmung fest. Insgesamt sind sowohl die experimentell ermittelten als auch die theoretisch hergeleiteten Grenzen [48] mit großen Unsicherheiten behaftet. Eine Übertragung auf typische Anwendungsfälle ist dadurch oft schwierig.

Der in Abbildung 2.11 angestellte Vergleich von experimentellen Ergebnisse verschiedener Autoren liefert einen Anhaltspunkt für erste Abschätzungen bzgl. der Stabilitätsgrenze von Filmströmungen. Bemerkenswert ist dabei, dass die Daten der einzelnen Quellen jeweils in unterschiedlichen Messstrecken aufgenommen wurden. Für Filmbeladungen $\Lambda_f > 100 \text{ mm}^2/\text{s}$ findet der Übergang in den überkritischen Bereich bereits bei relativ niedrigen Gasgeschwindigkeiten $v_g < 25 \text{ m/s}$ statt. Die meisten Experimente wurden ausschließlich mit Wasser als Filmmedium durchgeführt. Mit abnehmender Oberflächenspannung σ zeigt sich jedoch eine erhöhte Neigung des Filmes zum Tropfenabriss. In diesem Zusammenhang kann sich insbesondere bei Untersuchungen an Kraftstoffwandfilmen ein deutlich unterschiedliches Verhalten ergeben [4].

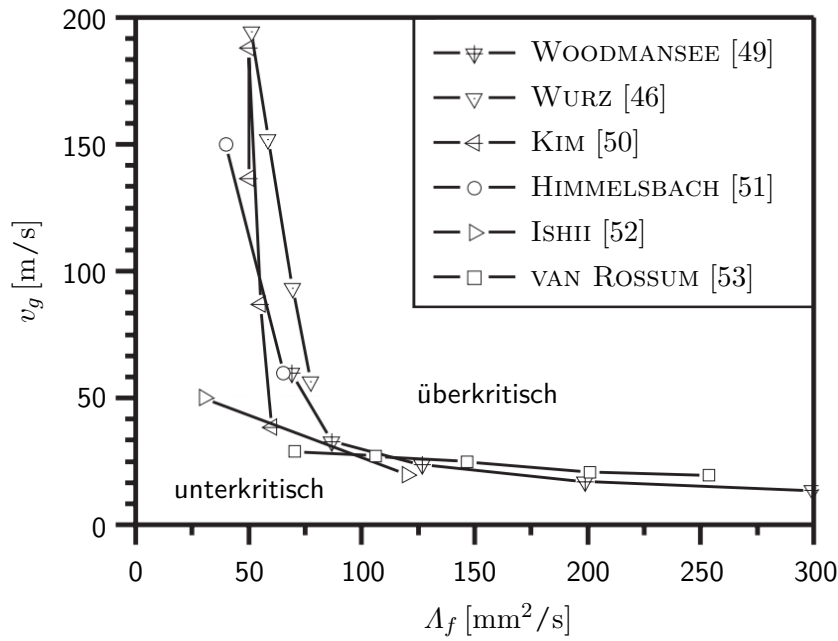


Abbildung 2.11: Stabilitätsgrenzen von schubspannungsgetriebenen Wandfilmen, Vergleich der experimentellen Ergebnisse verschiedener Autoren, nach [4]

Einige typische relevante Messgrößen bei Untersuchungen von Filmströmungen sind in Abbildung 2.12 dargestellt. Die Wechselwirkung an der Phasengrenze wird mithilfe der Grenzschubspannung $\tau_{g,f}$ im Abstand k_s zur Wand charakterisiert. In Kombination mit den internen Geschwindigkeitsprofilen von Film $v_f(y)$ und Gasphase $v_g(y)$ können weitere Schlussfolgerungen abgeleitet werden. Die vorliegende Arbeit ist inhaltlich auf die Bestimmung des zeitlichen Verlaufes der Filmdicke $\delta(t)$ bzw. der mittleren Filmdicke $\bar{\delta}$ mithilfe geeigneter Messtechnik konzentriert.

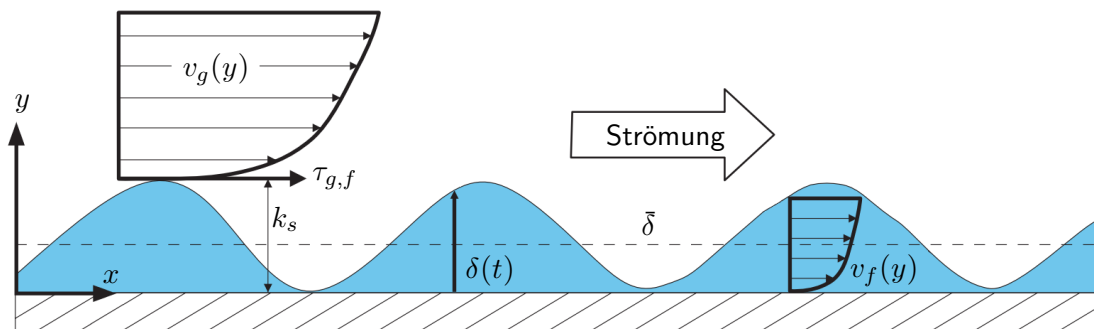


Abbildung 2.12: Typische Messgrößen bei der Untersuchung von Wandfilmströmungen, nach [4]

3 Messverfahren für Flüssigkeitsfilmdicken

Basierend auf einer Literaturstudie wird nachfolgend ein Überblick über verschiedene Verfahren zur Bestimmung der Dicke von Flüssigkeitsfilmen gegeben. Die Anwendbarkeit für die vorliegende Messaufgabe stellt dabei einen besonderen Aspekt dar. Es existieren weitere Übersichten [4, 54–58] mit anderen Schwerpunkten. Für jede der betrachteten Methoden wird das zugrundeliegende Konzept bzw. Messprinzip erläutert. Charakteristische Vor- und Nachteile, Besonderheiten oder Herausforderungen bei der praktischen Anwendung der Messverfahren in Form konkreter Messtechnik werden aus den einzelnen Quellen abgeleitet und zusammengefasst. An gegebener Stelle wird auf weiterführende Literatur verwiesen. Die gewonnenen Erkenntnisse bieten einen ersten Anhaltspunkt für die in Kapitel 4 beschriebene Auswahl und Erprobung von Messtechnik an einem generischen Strömungsprüfstand sowie für die spätere Integration eines Messsystems am Hochdruckprüfstand HBK-S.

3.1 Nadelkontakt

Die wahrscheinlich erste angewendete und damit älteste Methode zur Messung der Dicke eines ruhenden Flüssigkeitsfilmes auf einer festen Oberfläche ist das Nadelkontaktverfahren [56, 59–67]. Es beruht auf der Detektierung des Kontaktes zwischen einer Nadel und der Flüssigkeitsoberfläche.

Vorgesehen ist meist die Verwendung einer möglichst dünnen, spitzen Nadel mit einem Durchmesser in der Größenordnung $D \approx 0,3 \text{ mm}$, die mithilfe einer Traversiervorrichtung relativ zum Film positioniert werden kann. Zur Messung wird die Nadel solange in Richtung der Filmoberfläche bewegt bis es zu einer Berührung kommt. Zur Kalibrierung des Messgerätes wird der Nullabstand als Referenzpunkt bei Berührung von Nadel und fester Oberfläche im trockenen Zustand festgelegt. Die Dicke kann daraufhin als relative Lageänderung der Nadelspitze gemessen werden.

Die optische Feststellung des Kontaktpunktes von Nadel und Film mithilfe des menschlichen Auges stellt dabei einen möglichen, recht unkomplizierten Ansatz dar. Eine höhere Genauigkeit kann durch die Kombination mit einer elektrischen Leitfähigkeitsmessung erreicht werden. Die Nadel und die Filmflüssigkeit bzw. Wand werden jeweils separat mit den

Elektroden verbunden, sodass der Kontaktpunkt aufgrund der gleichzeitigen Schließung des Stromkreises messbar wird. Zusätzlich dazu kann die Nadel, mit Ausnahme der Spitze, mit einem elektrisch isolierenden Material beschichtet sein [56].

In Abbildung 3.1 sind verschiedenartige Ausführungsformen der elektrisch gestützten Nadelkontaktmethode schematisch abgebildet. In beiden Fällen ist die Nadel mechanisch an ein Distanzmessgerät gekoppelt, sodass die Positionsänderung der Nadelspitze gemessen werden kann. Der Einsatz wandbündiger Elektroden, wie in Abbildung 3.1 (b) kann zur Reduzierung ungewollter Strömungsbeeinflussung beitragen. Durch die dort ebenfalls gegebene Rotationsmöglichkeit der Nadelhalterung kann die Dicke des Wandfilmes an verschiedenen Punkten in Umfangsrichtung der Messstrecke vermessen werden. Um den Fluss eines elektrischen Stromes als Indikator für die Detektierung des Kontaktes zwischen Nadel und Film verwenden zu können, ist eine ausreichende elektrische Leitfähigkeit der Testflüssigkeit erforderlich. Insbesondere bei Kraftstoffen ist dies aufgrund fehlender freier Ladungsträger typischerweise nicht der Fall.

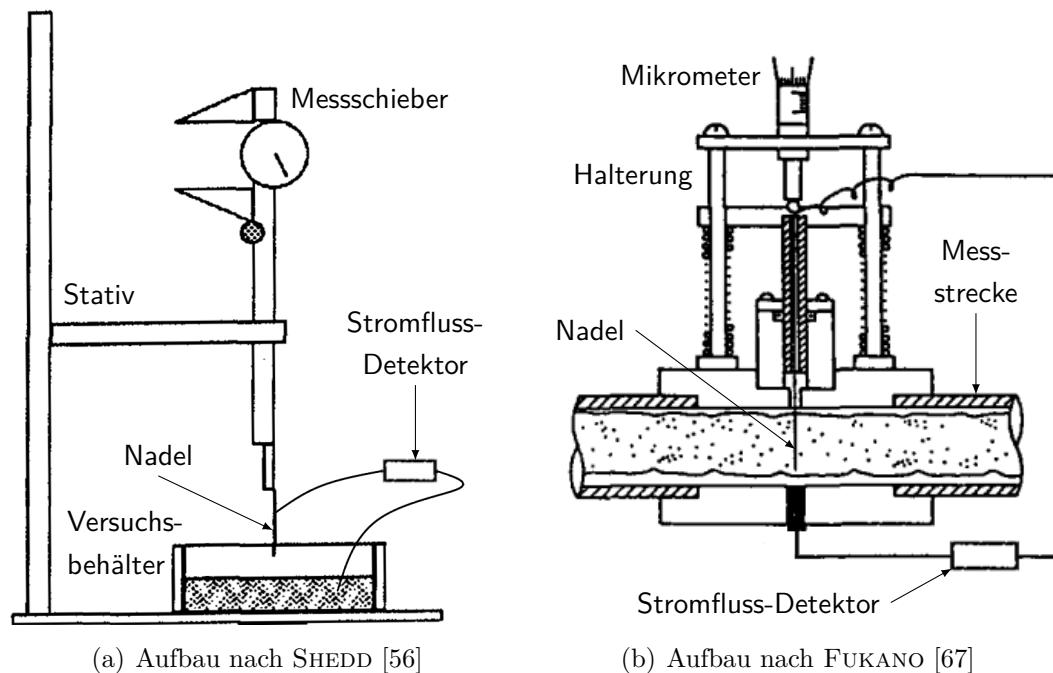


Abbildung 3.1: Anwendung des Nadelkontaktverfahrens in Kombination mit einem Stromfluss-Detektor, verschiedenartige Ausführungen

Die Nadelkontaktmethode wird häufig verwendet, um Referenzdaten für den Vergleich mit anderen Verfahren bereitzustellen. Die minimal messbare Filmdicke liegt im Bereich von knapp unter $100\text{ }\mu\text{m}$. Das Messbereichsmaximum ergibt sich entweder aus der Größe der Messstrecke oder wird von den Grenzen der Nadeltraversierung bestimmt, die mithilfe des angebundenen Messgerätes (z. B. Messschieber, Mikrometer etc.) erreichbar sind.

Die Herausforderung bei der Untersuchung welliger Filme besteht darin, dass dabei Unterbrechungen des elektrischen Kontaktes auftreten, wenn ein Wellental die Nadelspitze passiert. Periodische Kontaktabrisse können mithilfe statistischer Methoden behandelt werden [60]. Die Längenänderung der Nadel infolge thermischer Veränderungen oder die Bildung von

Tröpfchen an der Nadelspitze sind Effekte, die zusätzlich berücksichtigt werden können. Letzterer ist die Ursache für eine Hysterese bei der Detektierung des Kontaktes. Beim Auftauchen der Nadel aus dem Film kommt es aufgrund von Tropfenbildung zur elektrischen Überbrückung einer physikalisch bereits vorhandenen Distanz zwischen Nadelspitze und Filmoberfläche. Im Vergleich zum Vorgang bei Annäherung bzw. Eintauchen bleibt der Kontakt zur Oberfläche länger bestehen, was zur Messung einer zu großen Filmdicke führt. Insgesamt sind jedoch laut Literatur hohe Genauigkeiten bei der Bestimmung mittlerer Filmdicken erzielbar [66].

3.2 Elektrizität

Die elektrischen Methoden zur Bestimmung von Flüssigkeitsfilmdicken können unterteilt werden in leitfähigkeits- und kapazitätsbasierte Verfahren. Leitfähigkeitsmethoden bedienen sich Elektroden, um eine elektrische Potentialdifferenz zu erzeugen. Der sich ergebende Strom zwischen den Elektroden kann mit der Flüssigkeitsfilmdicke in Zusammenhang gebracht werden. Bei der Kapazitätsmethode werden aus Paaren bestromter Metallteile Kondensatoren gebildet. Die Abhängigkeit der Kondensatorkapazität von der Filmdicke wird analysiert und für Messungen genutzt.

3.2.1 Elektrische Leitfähigkeit

Die Leitfähigkeitsmethode ist aufgrund der Einfachheit ihres Konzeptes eine der am häufigsten verwendeten Methoden zur Vermessung von Flüssigkeitsfilmen [55, 61, 64, 68–87]. Zwischen zwei Elektroden, die jeweils in Kontakt mit der Flüssigkeit stehen, fließt ein elektrischer Strom. Die gemessene Stromstärke lässt Rückschlüsse auf die vorliegende Filmdicke zu, wobei eine ausreichende Leitfähigkeit des vorhandenen Mediums von entscheidender Bedeutung für die Messbarkeit ist.

Die einfachste Bauform einer solchen Leitfähigkeitssonde besteht aus einem Paar paralleler Drähte, wie etwa in Abbildung 3.2 dargestellt. Ausgehend vom theoretischen Ansatz ist die Stromstärke in diesem Fall direkt proportional zur Höhe, bis zu der die Flüssigkeit zwischen den Drähten steht. Die auch als Paralleldrahtsonde bezeichnete Ausführung markiert den Anfang der Entwicklungsgeschichte verschiedener Sondengeometrien. Die Optimierung der Gestaltung und Anordnung von Sonden sowie die notwendigen theoretischen Grundlagen sind in einigen frühen Arbeiten zu finden [61, 68, 69, 71, 72].

Ausgehend von den genannten Untersuchungen erfolgte eine zunehmende Verfeinerung der Paralleldrahtmethode in Form von fortgeschrittenen Schaltkreisen zur Signalkonditionierung [64, 73, 75, 76, 81, 84]. In den meisten der entwickelten Verfahren sind mehrere mögliche Messpositionen für die Sonde vorgesehen, angeordnet in regelmäßigen Intervallen rund um die Messstrecke. Die Montage erfolgt mithilfe eines geeigneten Stopfens, der an den entsprechenden Stellen eingebaut werden kann. In Kombination mit der Anwendung statistischer

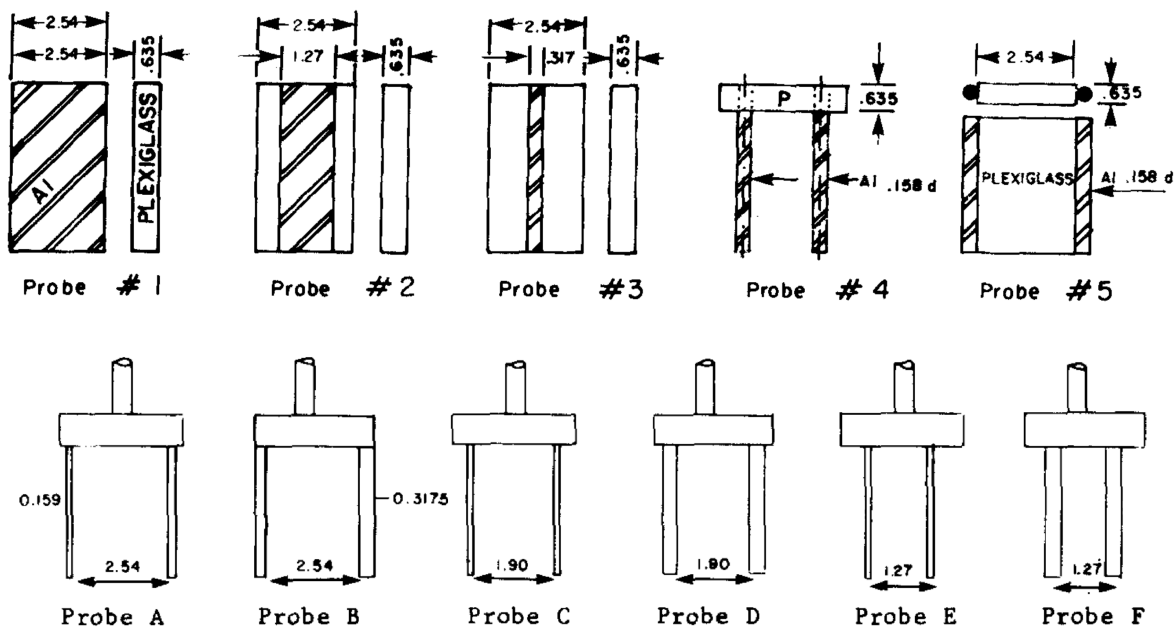


Abbildung 3.2: Leitfähigkeitsmethode, Untersuchung verschiedener Sondenbauformen, nach [72]

Auswertemethoden werden für Paralleldrahtsonden minimal messbare Filmdicken im Bereich $\delta_{min} \approx 200 \mu\text{m}$ angegeben [84]. Dieser Grenzwert wird maßgeblich durch den Einfluss der kapillaren Steighöhe der Flüssigkeit an den Elektroden bestimmt [56].

Die Messung von Filmdicken mithilfe von Leitfähigkeitssonden ist mit einigen Unzulänglichkeiten verbunden. Bezogen auf die Paralleldrahtmethode ist die Beeinflussung der Strömung als kritisch anzusehen. Abhängig von den vorliegenden Strömungsbedingungen kann es aufgrund des direkten Kontaktes im Umkehrschluss auch zu einer Schädigung der Messsonde durch die Strömung kommen [64]. Weiterhin stellt das Auftreten von Nichtlinearitäten in der Praxis häufig eine Herausforderung dar, obwohl laut Theorie ein linearer Zusammenhang zwischen Filmhöhe und Stromstärke zu erwarten ist. Regelmäßige Maßnahmen zur Kalibrierung von Elektroden und Testmedium bzw. der gesamten Mess- und Auswertekette sind erforderlich, um eine gleichbleibende Messgenauigkeit zu gewährleisten [73].

Der Einsatz von Wechselstrom sorgt für eine Rauschminderung und verlangsamt den Verfallsprozess der Elektroden [56]. Basierend auf verschiedenen Autoren haben sich Signalfrequenzen der Sondenimpulse im Bereich von 10 kHz und darüber als zielführend für eine verbesserte Sondenempfindlichkeit erwiesen [77, 79, 81]. Im abgedeckten Messbereich von 200 bis 6000 μm gelang eine Verbesserung auf 2 μm bei einem absoluten Messfehler von 20 μm .

Eine bedeutende Weiterentwicklung der oben beschriebenen Leitfähigkeitsmethode zeichnet sich durch wandbündig angebrachte Elektroden aus [74, 75, 78, 82, 83, 85–87]. Im Gegensatz zum Einführen von Drähten ist bei dieser Variante die Störung der Strömung erheblich geringer, was anhand von Abbildung 3.3 nachvollziehbar wird. Minimal messbare Filmdicken von $\delta_{min} \approx 10 \mu\text{m}$ sind auf diese Weise möglich [86, 87]. Die Verwendung bündig angeordneter Elektroden ist gleichzeitig mit einem höheren Kalibrieraufwand verbunden [75]. Weiterhin können zwar mehrere Messpositionen in Umfangsrichtung vorgesehen werden, eine Verschie-

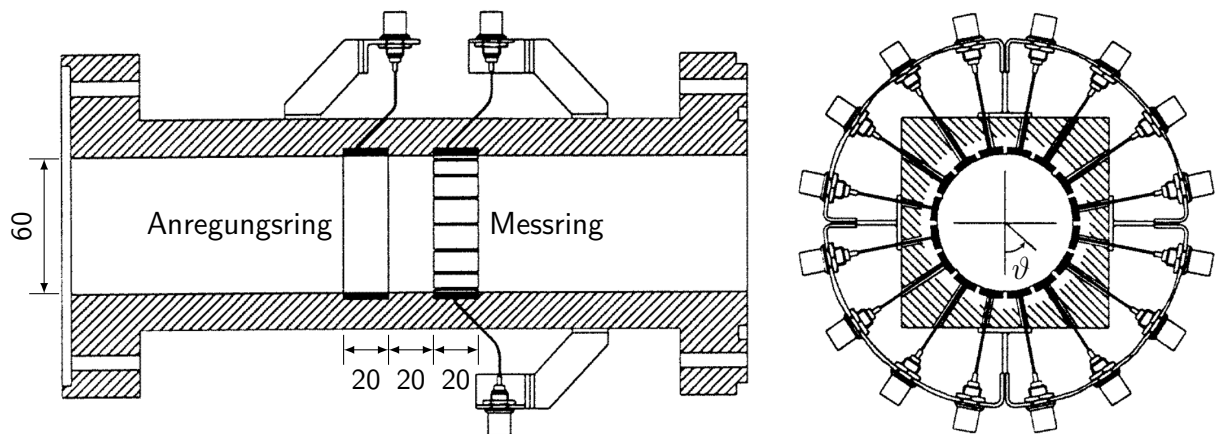


Abbildung 3.3: Leitfähigkeitsmethode, Verwendung wandbündiger Elektroden, Anordnung an mehreren Positionen in Umfangsrichtung um einen Kanal mit Kreisquerschnitt, Maße in mm, nach [82]

bung der Teststrecke entlang der Strömungsrichtung verursacht hingegen große Schwierigkeiten oder ist unmöglich, sodass für die Messung der Filmdicke an mehreren Positionen in Längsrichtung jeweils separate Testaufbauten notwendig sind.

Ein Problem von grundsätzlicher Natur ergibt sich aus der Art und Weise der Kalibrierung. Klassischerweise werden Daten aus der Vermessung von fallenden oder ruhenden Filmen mithilfe der Nadelkontaktmethode zugrunde gelegt. In beiden Fällen hat die Flüssigkeit häufig eine glatte Oberfläche und enthält mit hoher Wahrscheinlichkeit keine Gasblasen oder sonstige Inhomogenitäten. Dagegen liegt bei vielen Anwendungsfällen typischerweise eine horizontale Ringströmung vor. Der Flüssigkeitsfilm weist eine wellige Oberfläche auf und enthält viele Gasbläschen [55]. Infolgedessen können große Gradienten der Filmhöhe auftreten. Die Auswertung der Leitfähigkeitsmessung spiegelt immer die minimal vorliegende Filmhöhe zwischen den Elektroden wider, nicht etwa den Mittelwert. Der Einfluss von Gasblasen auf den gemessenen Leitfähigkeitswert ist zudem enorm. Insbesondere für sehr dünne Filmdicken $\delta < 200 \mu\text{m}$ ist eine starke Abnahme der Genauigkeit zu erwarten [56].

3.2.2 Elektrische Kapazität

Verfahren zur Filmdickenbestimmung, die auf der Messung der elektrischen Kapazität basieren, haben bereits eine ähnlich lange Entwicklung wie die Leitfähigkeitsmessungen durchlaufen. Zahlreiche verschiedene Autoren haben sich in umfassendem Maße mit der Thematik auseinandergesetzt [65, 70, 80, 88–99]. Bei der Anwendung von Leitfähigkeitsmethoden oder elektrisch gestützten Nadelkontaktverfahren ist stets eine ausreichende Leitfähigkeit der Flüssigkeit notwendig. Dieser entscheidende Nachteil besteht bei Kapazitätsmethoden nicht. Die Vermessung der Filmdicke ist auch bei nichtleitenden Medien möglich. Die dokumentierten Messwerte befinden sich im Bereich zwischen 10 und 5000 μm .

Die Gemeinsamkeit der oben genannten Quellen liegt jeweils im Messprinzip. Zwischen zwei Elektroden wird eine Wechselspannung angelegt und anschließend die Kapazität oder Admittanz der Schaltung ermittelt. Aus der Anwendung der elektromagnetischen Feldtheorie

in Kombination mit den Kenntnissen über die Geometrie der Teststrecke kann ein Zusammenhang zwischen Filmdicke und gemessener Kapazität abgeleitet werden. Abhängig von der geometrischen Komplexität liefert die gefundene Beziehung jedoch Ergebnisse von unterschiedlicher Qualität. Für komplexere Fälle ist meist die Erstellung von Kalibrierkurven für das Testmedium erforderlich [56].

Die große Menge an Literatur ergibt sich aus den unzähligen möglichen Messstreckengeometrien, den unterschiedlichen Arten von verwendeten Elektrodenbauformen und deren Konfigurationen. In Rohren mit rundem Querschnitt können beispielsweise radiale Kondensatoren eingesetzt werden, bei denen sich eine Elektrode im Zentrum der Messstrecke befindet und die andere außerhalb [93]. Die meisten Bauarten sind allerdings weniger invasiv, so etwa die Verwendung von Streifenelektroden [80,94,97], konzentrischen Elektroden, die in die Kanalwand eingelassenen sind [96,98] oder parallelen rechteckigen Plattenelektroden sowie Paaren ringförmiger Elektroden [91]. Der in [99] vorgestellte kapazitive Sensor basiert auf den speziellen Eigenschaften einer dielektrischen Beschichtung. Der Messkopf wird über dem Film positioniert und bildet einen Kondensator mit der Filmlaufläche, dessen Kapazität sich in Abhängigkeit von der Filmdicke verändert. Abbildung 3.4 veranschaulicht beispielhaft zwei der genannten Konzepte.

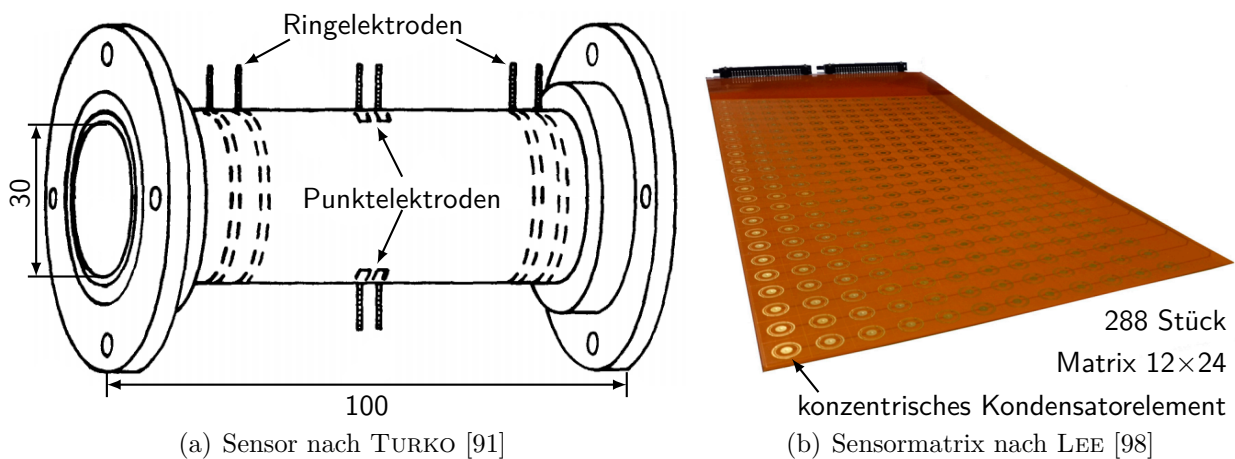


Abbildung 3.4: Kapazitätsmethode, verschiedene Bauformen wandbündiger Elektroden; Einsatz von Ring- und Punktelektroden in einem Rohr (a), Matrix aus konzentrischen Kondensatorelementen (b), Maße in mm

Bei der Umsetzung der Kapazitätsmethode sind einige Besonderheiten zu berücksichtigen. Um einen größeren Messbereich von Filmdicken abzudecken, kann der Abstand zwischen den Elektroden erhöht werden. Dadurch sinkt jedoch die Messempfindlichkeit für ein gegebenes Paar von Elektroden. Die Fähigkeit zur Abdeckung besonders großer Messbereiche ist folglich prinzipiell stark eingeschränkt. Weiterhin gilt besondere Vorsicht hinsichtlich eventuell auftretender Leckströme bei Kontakt zwischen Elektroden und Testmedium sowie der Abhängigkeit der Kapazität von der Flüssigkeitstemperatur [80].

Unabhängig von den bisher genannten Einflussfaktoren stellt die exakte Messung eines Kapazitätswertes an sich eine Herausforderung dar. Große Änderungen der Filmdicke rufen typischerweise lediglich Kapazitätsänderungen im Bereich einiger Picofarad hervor. Die Ver-

meidung von Streukapazitäten und Beeinträchtigungen durch sonstige Störquellen sowie die Wahl einer geeigneten Messfrequenz ist demzufolge entscheidend für die Qualität der Messergebnisse. Alle Kontakte, Leitungen und elektrischen Bauteile müssen abgeschirmt sein [89].

3.3 Akustik

Verfahren auf akustischer Basis haben prinzipiell den Vorteil, dass sie weder auf mechanische noch optische Zugänglichkeit des zu messenden Filmes angewiesen sind. Infolgedessen kommen sie vorwiegend an Stellen zum Einsatz, an denen typischerweise aufgrund des begrenzten Bauraumes keine andere Zugangsart geschaffen werden kann. Ultraschallwellen werden an Diskontinuitäten wie beispielsweise der Phasengrenzfläche flüssig-gasförmig reflektiert und gedämpft. Ein Großteil der Untersuchungen bezieht sich auf die Verwendung piezoelektrischer Ultraschallsensoren [100–129]. Neuere Arbeiten beschäftigen sich mit der Nutzung photoakustischer Messtechnik [130–138]. Auf diesem Gebiet ist jedoch weitere Grundlagenforschung notwendig, um eine konkrete Anwendung für die Bestimmung von Filmdicken zu ermöglichen.

Der Einsatz von Ultraschall-Messtechniken ist vielfach im Zusammenhang mit Festkörpern dokumentiert. Typische Anwendungsgebiete sind zerstörungsfreie Prüfverfahren zur Schadenserkennung oder Sensoren zur Eiserkennung an Flugzeugen [114]. Eine spezielle Variante der Laufzeitmethode basiert auf der Anregung von Oberflächenwellen [105], angewendet etwa für Dickenmessungen im Submikrometerbereich bei Aluminiumschichten auf Silizium-Wafern [111,112]. Mit der Übertragung auf Flüssigkeitsfilme ergeben sich Herausforderungen aufgrund der indirekten Kopplung des Transducers an den Film. Auf diese Weise kann eine Störung des Filmes ausgeschlossen werden, jedoch ist meist ein zusätzliches Koppelmedium erforderlich, um eine ausreichende Einschallung zu ermöglichen.

Die überwiegend verwendeten piezoelektrischen Ultraschallsensoren werden zur Vermessung von Schichtdicken typischerweise im Puls-Echo-Modus betrieben. Ein Transducer schallt ein Anregungssignal (Puls) in das Messobjekt ein und zeichnet das daraufhin abgegebene Antwortsignal (Echo) auf. Die Auswertung der durch Flüssigkeitsfilme erzeugten Resonanzwelle kann in zwei Kategorien unterschieden werden. Die Laufzeitmethode basiert auf dem Laufzeitunterschied, d. h. der Verzögerung zwischen Puls und Echo. In Kombination mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit der longitudinalen Schallwellen wird die Schichtdicke berechnet [104]. Die Bestimmung der Dicke durch Analyse des Echosignales im Frequenzbereich wird hingegen als Resonanzmethode bezeichnet. Der Name bezieht sich auf den Effekt der impulsinduzierten Resonanz, der das Antwortspektrum prägt. Die Schicht kann dabei als Halbwellenresonator für eine spezifische Frequenz aus dem Anregungspuls betrachtet werden [114].

Insbesondere bei den Untersuchungen zur Laufzeitmethode wird klar, dass eine Kalibrierung der Messkette unerlässlich ist, da die Schallgeschwindigkeit durch zahlreiche Faktoren beeinflusst wird [100,108]. Neben Änderungen aufgrund des Überganges der Schallwellen an

Mediengrenzen spielen bei der Impedanzbestimmung die Temperaturen und deren Gradienten innerhalb des Koppelmediums, der durchlaufenen Wände oder dem schallübertragenden Bauteil selbst eine wichtige Rolle [122]. Weiterhin treten Dämpfungseffekte beim Transport der Wellen auf [103].

Ein idealer Anregungspuls ist von unendlich kurzer Dauer und besitzt gleichzeitig eine hohe Energie. In der Praxis können jedoch stets nur endliche Pulsdauern erzeugt werden, Minimalwerte liegen bei etwa 200 ns [127]. Es kommt zu einer Überlappung von Anregungs- und Messsignal im Zeitbereich, wenn die Filmdicke einen kritischen Wert von $\delta \approx 50 \mu\text{m}$ unterschreitet [116].

PEDERSEN [114] nutzt in einer der ersten anwendungsorientierten Untersuchungen den in Abbildung 3.5 vereinfacht dargestellten Versuchsaufbau zur Bestimmung der Dicke von ruhenden Wasserfilmen. Die Schallwellen werden über einen 10 mm dicken Kupferblock eingekoppelt. Mehrere Voraussetzungen müssen für die Anwendbarkeit der verwendeten Resonanzmethode erfüllt sein. Die akustischen Impedanzen von Filmflüssigkeit und umgebenden Materialien müssen sich signifikant voneinander unterscheiden. Ansonsten findet keine ausreichende Reflexion der Schallwellen an der Phasengrenzfläche zur Umgebung statt. Weiterhin sollte der Flüssigkeitsfilm eine nahezu ebene Oberfläche besitzen. Krümmungen verursachen eine Reduzierung der periodischen Komponente des Antwortsignals. Dieser Informationsverlust führt zu Genauigkeitseinbußen oder ungültigen Messwerten.

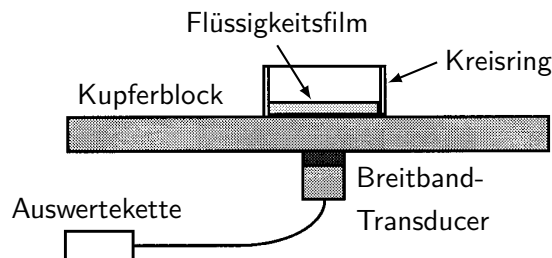


Abbildung 3.5: Versuchsaufbau zur Dickenmessung an ruhenden Wasserfilmen mithilfe eines breitbandigen Ultraschall-Transducers, nach [114]

Auch zur Überwachung von Schmiermittelfilmen in Roll- und Gleitlagern kann Ultraschallmesstechnik zum Einsatz kommen. Ein entsprechend instrumentierter hydraulischer Gleitlagerprüfstand ist in Abbildung 3.6 dargestellt. Typischerweise treten Filmdicken im Bereich $\delta < 100 \mu\text{m}$ auf [116]. Spezielle mathematische Modelle zur Beschreibung von Ölschichten zwischen Festkörpern wurden entwickelt, um die Resonanzmethode anwenden zu können. Das Continuum Model betrachtet den Film als Kontinuum von ausreichender Dicke ca. $\delta > 10 \mu\text{m}$, sodass sich die erste Resonanzfrequenz noch innerhalb des praktisch abdeckbaren Frequenzmessbereiches bis etwa 70 kHz befindet [106, 109, 110]. Für dünnere Filme wird die Interaktion einer Ultraschallwelle von den Steifigkeitseigenschaften der Schicht dominiert [107]. Im sog. Spring Interface Model (engl. etwa Federschnittstellenmodell) wird demnach die Flüssigkeitsschicht ausschließlich in Form von Steifigkeitseffekten bei der Interaktion der beiden umgebenden Festkörper bzw. Lagerkomponenten berücksichtigt. Die Amplitude des Antwortsignals wird gemessen und mithilfe des Modelles interpretiert [101, 113]. Durch die

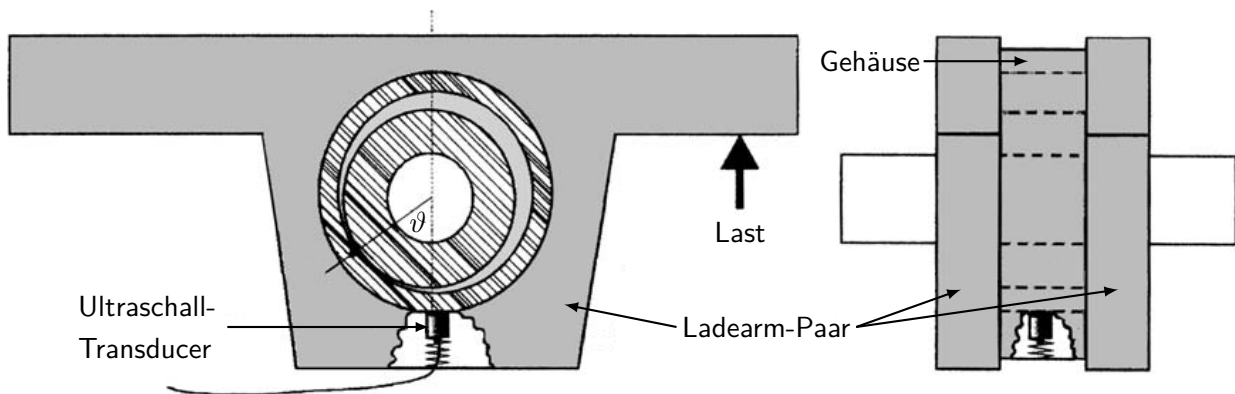


Abbildung 3.6: Schematischer Aufbau eines hydraulischen Gleitlagerprüfstandes, Schmiermittelfilmdickenmessung mittels integriertem Ultraschall-Transducer, nach [118]

Kombination der beiden Modelle konnten in zahlreichen Untersuchungen [115–123, 125–129] Filmdicken sowohl im Submikrometerbereich $\delta_{min} \approx 0,03 \mu\text{m}$ [122] als auch bis in den Bereich $\delta > 100 \mu\text{m}$ bestimmt werden.

Die Existenz einer zweiten Phase, etwa aufgrund von Gasblasenbildung bei kondensierenden oder verdampfenden Filmen [121], verursacht eine Reduzierung der effektiven Schallgeschwindigkeit im Medium. Bereits bei einer Störung durch kleine Gaseinschlüsse ergeben sich mit Ultraschallmessungen deutlich zu große Filmdicken. Größere Einschlüsse können zu einer vollständigen Reflexion des Signales an der Grenzfläche zwischen Öl und Gasblase führen [122–124].

3.4 Strahlungsdämpfung

Die Dämpfung von elektromagnetischer Strahlung ist in Flüssigkeiten und Festkörpern im Allgemeinen höher als in Gasen. Aus der Differenz zwischen dem Energieniveau vor und nach dem Durchgang durch einen Film kann auf dessen Dicke geschlossen werden. Diese Vorgehensweise kann auf sichtbare (Abschnitt 3.5) und nicht-sichtbare Strahlung angewendet werden. Der folgende Abschnitt beschäftigt sich mit Strahlung im nicht-sichtbaren Wellenlängenbereich.

3.4.1 Mikrowellenstrahlung

Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Messverfahren ist über die Verwendung von Mikrowellenstrahlung zur Bestimmung von Flüssigkeitsfilmdicken nur sehr wenig Literatur zu finden. Ein Grund dafür könnte sein, dass beim Arbeiten mit Mikrowellenstrahlung allgemein ein erhöhtes Risiko für Menschen besteht. Fundierte Kenntnisse über Mikrowellensysteme sind notwendig, um wirksame Sicherheitsvorkehrungen vorsehen zu können. Die speziell angefertigten Messstrecken sind zudem meist semi-permanent, was die Flexibilität des Betriebes

zusätzlich einschränkt. Insgesamt erschweren die genannten Faktoren den Integrationsprozess für industrielle Anwendungen, sodass die Motivation für Forschungsaktivitäten bisher gering ist.

In einem relativ engen Messbereich von 400 bis etwa 1000 μm ist die Messung der Filmdicke unter Zuhilfenahme von Mikrowellenstrahlung durch ROY [139] dokumentiert. Im Experiment, siehe Abbildung 3.7, wurden Messungen anhand einer symmetrischen fallenden Zwei-Phasen-Ringströmung durchgeführt. Dazu ist ein spezieller Mikrowellenleiter mit einer zentral montierten Messstrecke aus Plexiglas vorgesehen, dessen Konstruktion die Durchströmung mit Flüssigkeit ermöglicht. Zur Messung wird an der einen Seite des Wellenleiters Mikrowellenstrahlung mit einer Frequenz von 1,22 GHz ausgesendet. Auf dem Weg durch die Messkammer erfolgt eine teilweise Absorption. Auf der gegenüberliegenden Empfängerseite wird die Intensität der verbleibenden Strahlung nach Dämpfung gemessen. Durch Differenzbildung mit der ursprünglich ausgesandten Strahlungsintensität wird die Filmdicke ermittelt. Die hohe Linearität der Kalibrierkurve ermöglicht sehr präzise Messungen und eine gute Wiederholbarkeit innerhalb des kalibrierten Messbereiches.

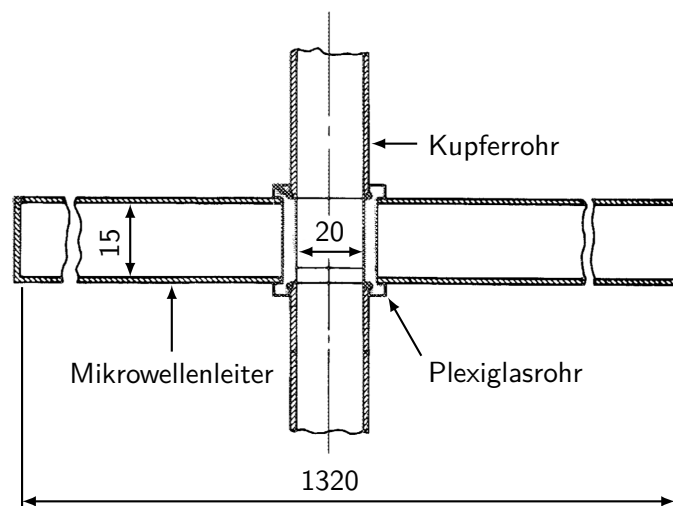


Abbildung 3.7: Messung von Filmdicken mithilfe von Mikrowellenabsorption, Maße in mm, nach [139]

3.4.2 Hochenergiestahlung

In radiometrischen Verfahren kommt elektromagnetische Strahlung mit hoher Energie zum Einsatz, z. B. Röntgen-, Gamma- oder Neutronenstrahlung. Ähnlich zur Vorgehensweise bei Mikrowellen sind spezielle Schutzmaßnahmen erforderlich. Die rundum abgeschirmte Strahlungsquelle besitzt eine Öffnung, an der sich ein Kollimator befindet. Dieser bündelt die ausgehenden Wellen und erzeugt einen auf das Messobjekt gerichteten Strahl. Ein System bestehend aus einem oder mehreren Detektoren dient zur Aufnahme der Strahlung nach dem Durchgang durch die Messstrecke. Sensoren messen die verbleibende Intensität nach erfolgter Dämpfung [57].

Eine häufige Anwendung besteht darin, Informationen über die Strömung innerhalb von geschlossenen, optisch nicht zugänglichen Rohren zu erhalten. Aufgrund der typischerweise darin vorherrschenden Zweiphasen-Ringströmung passiert die Strahlung den flüssigen Wandfilm sowohl nach dem Durchdringen der Rohrwand beim Eintritt als auch unmittelbar vor dem Austritt. Als Ergebnis werden die gemittelten Anteile von Flüssigkeit oder Gas im Strömungsquerschnitt bestimmt. Die Messung einer lokalen Filmdicke ist bisher nicht dokumentiert. Unter Kenntnis der Geometrie des Strömungsquerschnittes ist es theoretisch möglich, eine mittlere Filmdicke im Querschnitt zu berechnen [140].

Gammastrahlung wird in einigen Untersuchungen zur Dichtemessung in Rohren und zur Bestimmung des Strömungsregimes der Zweiphasenströmung darin eingesetzt [140–143], siehe Abbildung 3.8. Ein spezielles Anwendungsfeld dafür stellt beispielsweise die Strömung in Öl-Pipelines dar [144]. Eine Vielzahl weiterführender Literatur auf diesem Gebiet ist in [140] und [142] zu finden. Ähnliche Arbeiten sind für Neutronen- [145, 146] und Röntgenstrahlung [147] durchgeführt worden.

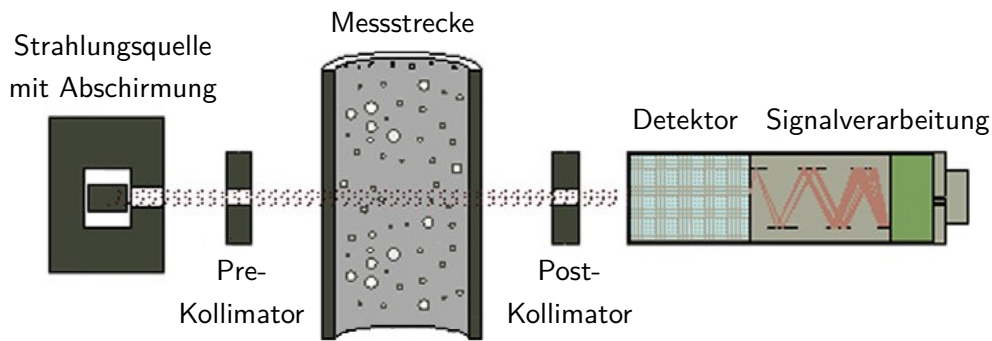


Abbildung 3.8: Gammastrahlen-Densitometer, Strahlungsquelle Radionuklid ^{137}Cs mit Bleiummantelung, Natriumiodid-Szintillationszähler als Detektor, Signalverarbeitung mit Verstärker, nach [140]

3.5 Lichtabsorption

Der folgende Abschnitt bezieht sich speziell auf Verfahren unter Nutzung elektromagnetischer Strahlung mit Wellenlängen im sichtbaren sowie im Nahinfrarotbereich [1, 2, 54, 148–164]. Analog zur Vorgehensweise bei nicht-sichtbarer Strahlung (vgl. Abschnitt 3.4) wird die Strahlungsabsorption in Flüssigkeiten gezielt genutzt. Die Änderung bzw. Abschwächung der Intensität beim Durchgang durch das Fluid kann dabei in Zusammenhang mit der Filmdicke gebracht werden.

Das allgemeine Funktionsprinzip von Absorptionsmessungen im Durchlichtverfahren ist in Abbildung 3.9 dargestellt. Unter Verwendung des LAMBERT-BEER'schen Gesetzes kann die Filmdicke δ berechnet werden.

$$\delta = -\frac{1}{k'} \cdot \ln \left(\frac{I_M}{I_0} \right) \quad (3.1)$$

Dabei ist I_0 die Primärintensität vor dem Durchgang durch einen Film mit dem Absorptionskoeffizienten k' . Die nach dem Durchgang gemessene, abgeschwächte Lichtintensität wird mit I_M bezeichnet. Das Messbereichsmaximum wird durch die Filmdicke bestimmt, bei der das Licht vollständig absorbiert wird, sodass $I_M = 0$. Das Minimum entspricht der kleinsten messbaren Änderung der Intensität $\Delta(I_0 - I_M)_{min}$ beim Durchgang durch die Flüssigkeit. Minimale Filmdicken im Bereich $\delta \approx 25 \mu\text{m}$ sind messbar [2].

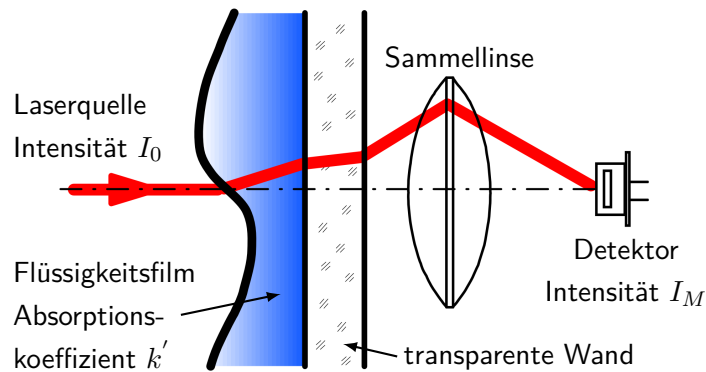


Abbildung 3.9: Messprinzip von Durchlichtverfahren, Laserstrahl mit Primärintensität I_0 wird durch den Film mit Absorptionskoeffizient k' abgeschwächt, Messung der Intensität I_M am Detektor, nach [2]

Die Absorptionsfähigkeit unterscheidet sich je nach verwendetem Medium und weist eine charakteristische Wellenlängenabhängigkeit auf. Durch Kalibrationsmessungen kann die spezifische Absorptionsfähigkeit der Filmflüssigkeit bei der eingesetzten definierten Wellenlänge ermittelt werden. Die von SATTELMAYER [54] verwendete Kalibrierzelle etwa wird kontinuierlich vom Testmedium mit einer definierten Filmdicke durchströmt. Fehler aufgrund von Änderungen der Flüssigkeitszusammensetzung, Temperaturschwankungen oder Unzulänglichkeiten der optischen Oberflächen können in der Auswertung berücksichtigt werden. Bei jeder Messung werden zeitgleich Daten aus Messstrecke und Kalibrierzelle aufgenommen und anschließend für entsprechende Korrekturen an den Rohdaten genutzt.

Bei einem hohen Absorptionskoeffizienten der Filmflüssigkeit verursachen bereits kleine Änderungen der Filmdicke deutlich messbare Unterschiede in der gemessenen Lichtintensität. Eine Abstimmung der verwendeten Laserwellenlänge auf Maxima im Absorptionsspektrum des Testmediums ist möglich. Beispielsweise kann die erhöhte Absorptionsfähigkeit von Wasser im Infrarotbereich genutzt werden [148–151, 153, 161]. Um die Handhabung zu vereinfachen, wird meist gleichzeitig ein Laser im sichtbaren Bereich eingesetzt. Ein weiterer Vergleichsstrahl kann für die Berücksichtigung von Reflexionsverlusten verwendet werden. Diese treten im gesamten Strahlengang auf, insbesondere jedoch an der Flüssigkeitsoberfläche [1, 2]. Die industrielle Anwendung im Automobilbereich sowie umfangreiche weiterführende Literatur zu Laserabsorptionsspektroskopie mit abstimmbaren Dioden (TDLAS, Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy) ist in [155] und [157] beschrieben.

Alternativ besteht die Möglichkeit, der Filmflüssigkeit Farbstoffe beizumischen, um den Absorptionskoeffizienten im sichtbaren Wellenlängenbereich zu erhöhen und damit die Empfindlichkeit des Messverfahrens zu verbessern [152, 154]. Bei der Untersuchung verdampfender

Filme besteht das Problem, dass Farbstoff und Filmflüssigkeit unterschiedliche Verdampfungsverhalten aufweisen. Es kommt auf der Filmlauffläche zu Farbstoffablagerungen, die die Intensitätsmessung verfälschen [154, 156]. Weitere Herausforderungen bei der Anwendung von Lichtabsorptionsmethoden bestehen hinsichtlich der Positioniergenauigkeit der Lichtquelle relativ zum Film sowie der Gewährleistung einer stabilen Primärintensität [58].

Die Entwicklung von Verfahren zur einseitigen Vermessung von Wandfilmen eröffnet zusätzlich solche Anwendungsgebiete, in denen Durchlichtverfahren aus verschiedenen Gründen nicht eingesetzt werden können [158–160, 162–164]. In Abbildung 3.10 ist ein typischer Versuchsaufbau für die einseitige Bestimmung der Filmdicke dargestellt. Unter Nutzung von Retro-Reflexion an der Filmlauffläche wird der einfallende Laserstrahl zur offenen Filmseite hin umgelenkt und durchläuft den Film dabei zweimal. Die Reflexionseigenschaften können durch die gezielte Manipulation der Filmlauffläche oder durch die Verwendung spezieller Folien eingestellt werden.

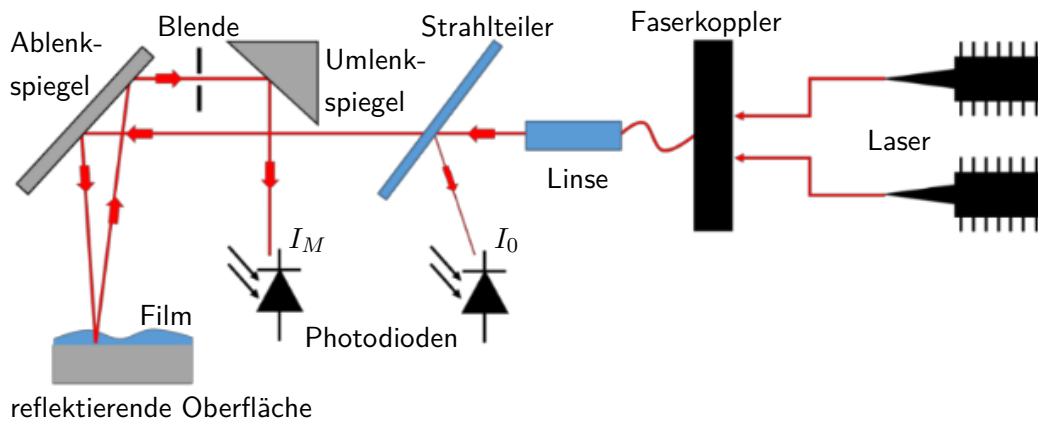


Abbildung 3.10: Einseitige Vermessung eines Flüssigkeitsfilmes mithilfe von Retro-Reflexion an der Filmlauffläche, schematischer Versuchsaufbau nach [162]

3.6 Lichtreflexion

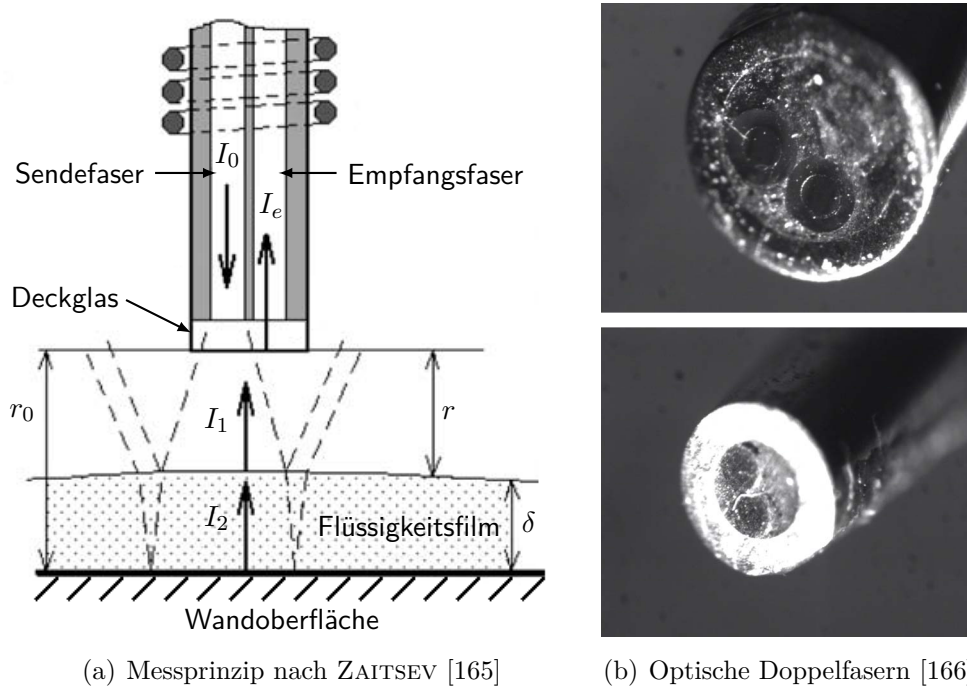
Die folgenden Teilabschnitte behandeln verschiedene Messverfahren, bei denen insbesondere die Reflexion an der Phasengrenzfläche zwischen Flüssigkeit und umgebender Gasphase gezielt genutzt wird, um Informationen über den Film zu erhalten. Hinsichtlich der ein- und ausfallenden Strahlen bestehen prinzipiell zwei Möglichkeiten. Bei äußerer Reflexion befinden sich beide in der Gasphase, bei innerer Reflexion in der Flüssigphase.

Die Abschnitte 3.6.1 und 3.6.2 beziehen sich auf Verfahren, die ausschließlich auf der äußeren bzw. inneren Reflexion an der Phasengrenze basieren. Die in den Abschnitten 3.6.3 bis 3.6.6 beschriebenen Messmethoden nutzen zusätzlich Reflexionseffekte, die an der Filmlauffläche auftreten.

3.6.1 Äußere Reflexion

Die äußere Reflexion des Lichtes an der Oberfläche von Flüssigkeiten kann neben der Bestimmung der Dicke gleichzeitig genutzt werden, um die Oberflächenkrümmung zu ermitteln. Für die in [66] beschriebene Methode kommen zwei Laserquellen zum Einsatz. Einer der Strahlen verläuft senkrecht zur Wand, auf der sich der Flüssigkeitsfilm befindet. Der andere Strahl ist in einem bestimmten Winkel zur Wandnormalen ausgerichtet. Die Strahlengänge werden nach der Reflexion unter Verwendung eines Systems von Spiegeln auf einen Bildschirm umgelenkt. Eine Kalibriermessung auf der Wand im trockenen Zustand ergibt Referenzpunkte. Mithilfe dieser können anschließend Filmdicken im Bereich von 500 bis 2000 μm sowie Oberflächenkrümmungen am Messpunkt ermittelt werden. Solange eine reflektierende Oberfläche existiert, ist die Methode unabhängig von den sonstigen optischen Eigenschaften des Fluides anwendbar. Probleme ergeben sich aus der Notwendigkeit einer extrem genauen Positionierung und Fixierung von Laserlichtquellen, Spiegeln und Bildschirm relativ zueinander. Das Verfahren zeigt eine eintsprechend hohe Vibrationsempfindlichkeit [66].

Für die Methode der Filmdickenbestimmung in Abbildung 3.11 (a) wird eine Messsonde mit einer optischen Doppelfaser im Abstand r_0 zur Wand beschrieben. Eine der Fasern wird von einer Halogenlampe als Lichtquelle der Intensität I_0 beleuchtet. Die andere Faser detektiert die reflektierte Lichtintensität I_e , die mit dem Abstand der Filmoberfläche vom Messkopf r variiert. Die Filmdicke δ wird als Differenz $\delta = r_0 - r$ berechnet. Der Messbereich reicht etwa von 50 bis 800 μm . Weitere Autoren haben sich ebenfalls mit faseroptischen Methoden beschäftigt, ein Überblick ist in [166] zu finden. Ein grundsätzliches Problem besteht bei der



(a) Messprinzip nach ZAITSEV [165]

(b) Optische Doppelfasern [166]

Abbildung 3.11: Verwendung optischer Doppelfasern zur Filmdickenmessung, Messprinzip unter Nutzung von äußerer Reflexion an der Filmoberfläche (a), Detailaufnahmen optischer Doppelfasern (b)

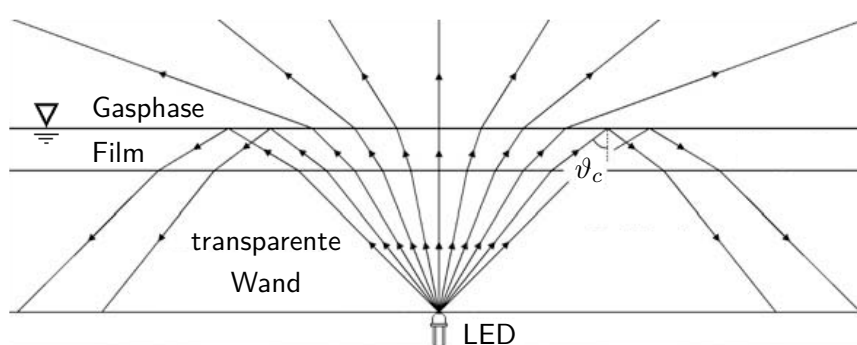
Vermessung von welligen Filmen. Das Licht wird von den geneigten Wellenflanken in verschiedene Raumrichtungen reflektiert, sodass kein einfacher Zusammenhang mehr zwischen Intensität und Filmdicke besteht und die Verfahren versagen [165].

3.6.2 Innere Reflexion

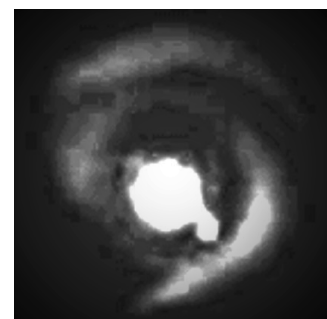
Die Nutzung optischer Fasern ist nicht auf Verfahren mit äußerer Reflexion beschränkt. Der Effekt der inneren Totalreflexion kann durch die Einbettung solcher Fasern in die Kanalwände zur Filmdickenbestimmung nutzbar gemacht werden. Über ein System aus emittierenden und empfangenden optischen Fasern kann das Licht sowohl eingekoppelt als auch das Messsignal detektiert werden. Die emittierende Faser verläuft beispielsweise zentral und ist von empfangenden Fasern umgeben [167, 168]. Umgekehrt kann auch ein Bündel von Empfangsfasern zum Einsatz kommen, die durch emittierende Fasern umschlossen sind [169]. Auch Einzelfasersysteme sind möglich [170].

Die Intensität des aufgefangenen Lichtes wird mithilfe von Photodioden gemessen und kann anschließend zur Bestimmung der Filmdicke weiter verarbeitet werden. Das nichtlineare Verhalten sowohl der Photodiode als auch des reflektierten Lichtes macht die Definition einer spezifischen Kalibrierkurve erforderlich. Je nach Flüssigkeit variiert außerdem die maximal messbare Filmdicke, bedingt durch Sättigungseffekte der Photodiode. Eine regelmäßige Kalibrierung des Messsystems ist notwendig, um Fehler aufgrund von Veränderungen der optischen Oberflächen sowie der Temperatur der Photodiode zu minimieren. Ein Filmdickenmessbereich von 25 bis 2000 μm ist dokumentiert [169].

Aufgrund der dauerhaften Fixierung der optischen Fasern durch Einbettung in die Kanalwand ergibt sich eine höhere Konstruktionskomplexität bei gleichzeitig sinkender Einsatzflexibilität. Zusätzlich kann es zu Strömungsbeeinflussungen kommen. Für die Methode in [172] wird eine Lichtquelle an der Außenseite einer transparenten Kanalwand befestigt. Dort dient eine dünne undurchsichtige Beschichtung als Schirm, auf dem das von der Filmoberfläche reflektierte Licht abgebildet wird. Abbildung 3.12 (a) veranschaulicht die Entstehung ei-



(a) Entstehung eines Lichttringes, nach [56]



(b) Bild bei Wellen auf der Filmoberfläche, nach [171]

Abbildung 3.12: Bildung eines charakteristischen Lichtbildes auf der Wandaußenseite aufgrund von innerer Totalreflexion an der Filmoberfläche; Prinzipskizze (a), typisches Bild bei Untersuchung welliger Filme (b)

nes Lichtringes in einem bestimmten Abstand rund um die Lichtquelle, bedingt durch das Auftreten innerer Totalreflexion an der Phasengrenzfläche zwischen Flüssig- und Gasphase. Der Radius des Lichtkreises ist direkt proportional zur vorliegenden Filmdicke, die aus der Differenz zu einer Referenzmessung bei trockener Wand berechnet wird. Filmdicken von minimal $100\text{ }\mu\text{m}$ [170] und maximal $6000\text{ }\mu\text{m}$ [171] können auf diese Weise bestimmt werden. Einsetzbar sind alle Flüssigkeiten, die das Licht der Lichtquelle im Bereich der maximal zu untersuchenden Filmdicken nicht zu stark absorbieren. Eine Kalibrierung ist bei der genannten Lichtringmethode mit innerer Totalreflexion nicht erforderlich.

Es existieren einige Weiterentwicklungen der Methode durch andere Autoren [56,171]. Durch die Erweiterung auf ein System aus zwei beieinander positionierten Lichtquellen kann beispielsweise die Oberflächenkrümmung ermittelt werden [56]. Bei der Untersuchung welliger Filme entsteht typischerweise kein kreisrunder Lichtring mehr, wie Abbildung 3.12 (b) zeigt, sodass der Algorithmus zur Datenauswertung angepasst werden muss [171].

3.6.3 Interferometrie

Interferometrische Verfahren zur Filmdickenbestimmung basieren auf Interferenzeffekten bei der Überlagerung mehrerer Lichtwellen, die unterschiedliche optische Weglängen zurückgelegt haben [58]. Die Lichtreflexion an jeder Grenzfläche beim Übergang von einem Material in ein anderes ist abhängig von Wellenlänge und Einfallswinkel. Diese Abhängigkeit wird zur Erzeugung charakteristischer räumlicher Interferenzstreifenmuster genutzt, aus denen Informationen über die Dicke eines transparenten Flüssigkeitsfilmes abgeleitet werden können [173–177]. Das Prinzip ist in Abbildung 3.13 dargestellt.

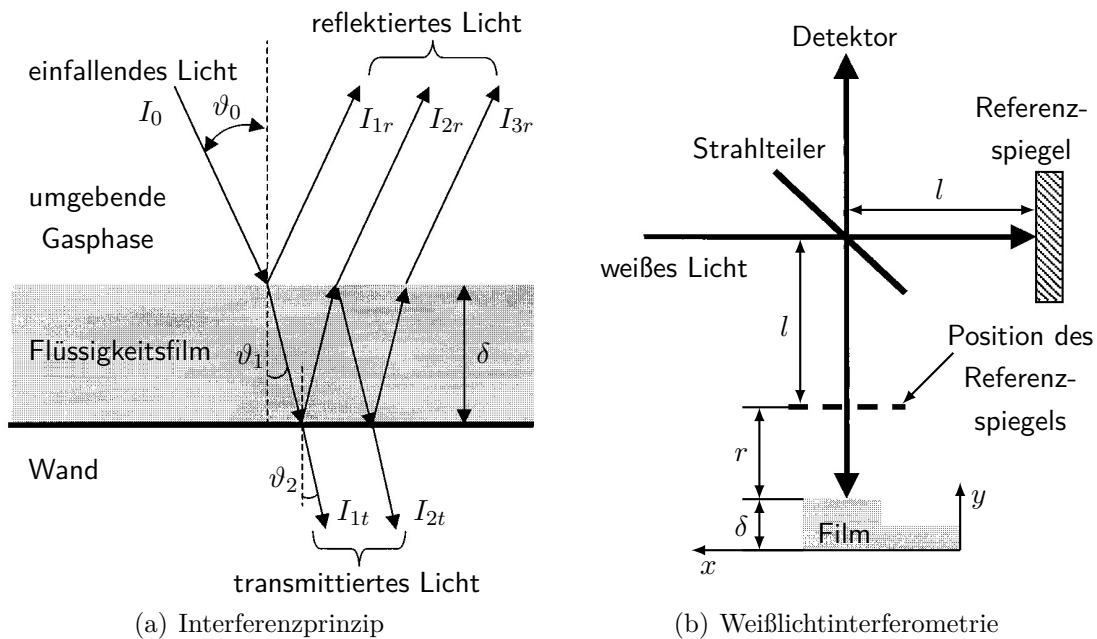


Abbildung 3.13: Interferometrisches Messverfahren, Entstehung von Interferenzstreifenmustern (a), schematischer Aufbau zur Weißlichtinterferometrie, nach [177]

Spezielle Varianten von Interferometriemethoden werden von verschiedenen Autoren beschrieben. Das in [178] angewendete Verfahren wird als spektral aufgelöste Phasenverschiebungsinterferometrie (spectrally resolved phase-shifting interferometry) bezeichnet. Die Phasenverschiebung des von der Wandoberfläche zurückgeworfenen Lichtes der Weißlichtquelle wird in spektral aufgelösten Interferogrammen analysiert. Bei der LCI-Methode (low-coherence interferometry, engl. etwa Interferometrie mit niedriger Kohärenz) kommt ebenfalls eine sehr hell leuchtende weiße LED zum Einsatz. Mit ihr können beispielsweise dünne Alkanfilme vermessen werden [179]. Ein weiteres Verfahren basiert auf dem Einsatz eines Wellenlängenabtastungsinterferometers (wavelength scanning interferometer), das eine Kombination aus Weißlicht- und Nahinfrarot-LED darstellt. Bei der Vermessung der Filmdicke ist damit gleichzeitig eine Kompensation von Umgebungsstörungen und Vibrationen möglich [180, 181].

Die sog. Streifenmethode (fringe method) wurde zunächst bei der Untersuchung von Filmdicken bei Zweiphasenströmungen in Kapillaren angewendet [182]. Später wurde das Verfahren auf dünne transparente Filme erweitert, die sich auf freien Oberflächen befinden [183, 184]. Dabei wird der Flüssigkeitsfilm durch eine kohärente Lichtquelle in einem festen Winkel beleuchtet. Die entstehenden Streifenmuster werden projiziert und ausgewertet, um die Dicke des Filmes zu ermitteln. Unter der Bezeichnung Mikrointerferometrie bzw. RICM (Reflection Interference Contrast Microscopy) wird eine nahezu identische Vorgehensweise beschrieben [185–187]. Ein weiteres ähnliches Verfahren leitet aus der Transformationsfunktion des optischen Aufbaus einen analytischen Zusammenhang zwischen Interferenzstreifenmuster und Filmdicke ab [188]. Die von den Streifen verursachten Intensitätsschwankungen können der Filmdicke zugeordnet werden, ohne dass eine separate Kalibrierung notwendig ist.

Mithilfe verschiedener interferometrischer Verfahren sind Schichtdicken vom Submikrometerbereich [175] bis über $1000\text{ }\mu\text{m}$ [174] messbar. Anwendungsbereiche sind etwa die Nichtgleichgewichtskondensation von Dampf in Zweiphasenströmungen, bei Verbrennungsprozessen oder am Boden von Stoßrohren. Die Größe des jeweiligen Messbereiches bei Anwendung einer einzelnen Methode ist jedoch typischerweise auf wenige $100\text{ }\mu\text{m}$ beschränkt. Weiterhin ist die zeitliche Auflösung für die Untersuchung von hochgradig instationären, welligen Filmen tendenziell nicht geeignet [58].

3.6.4 Chromatisch-konfokales Messverfahren

Das chromatisch-konfokale Messverfahren wurde bereits von mehreren Autoren in unterschiedlichen Bereichen eingesetzt, etwa zur Vermessung von Oberflächenrauigkeiten [189], zur Bestimmung der Mittendicke von Linsen [190] oder für zeitaufgelöste Messungen der Dicke welliger Fallfilme [191] sowie verdampfender Filme [192–194]. Die Methode beinhaltet die gezielte Nutzung der chromatischen Aberration einer Strahloptik sowie das konfokale Abbildungsprinzip. Die Bezeichnung setzt sich aus diesen zwei Teilaspekten zusammen. In Abbildung 3.14 ist das chromatisch-konfokale Messprinzip schematisch dargestellt.

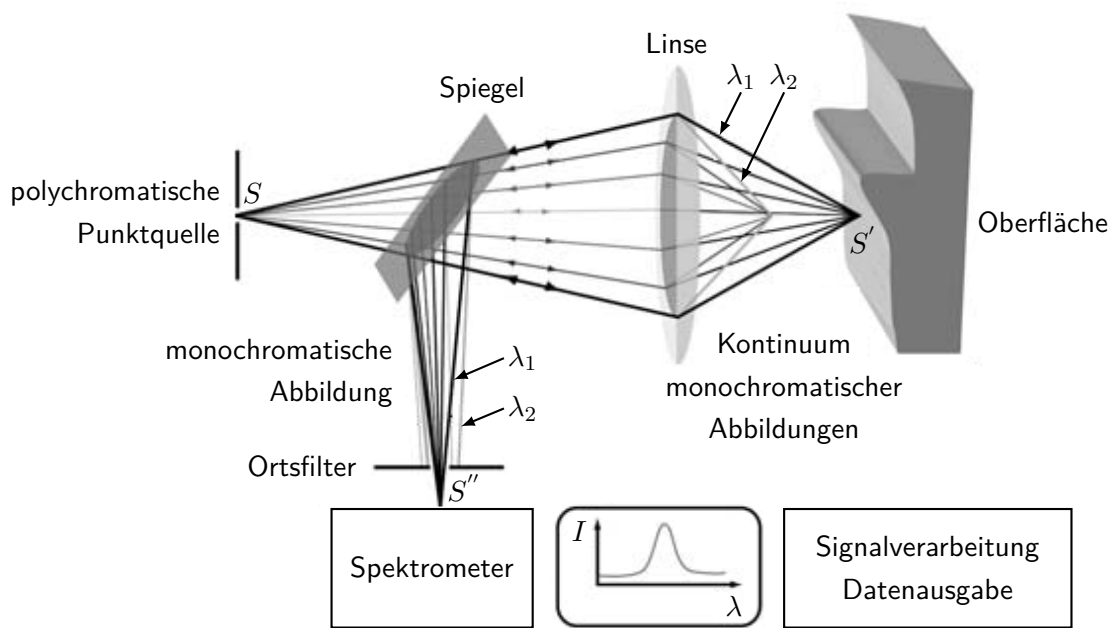


Abbildung 3.14: Chromatisch-konfokales Messprinzip, Weißlichtquelle, Messkopf mit hoher chromatischer Aberration, spektrale Auswertung des reflektierten konfokal abgebildeten Lichtes, nach [191]

Das Licht einer Weißlichtquelle (z. B. LED oder Halogen-Lampe) wird über eine optische Faser durch einen Faserkoppler geleitet, der als halbdurchlässiger Spiegel fungiert. Die Linse bzw. das Linsensystem im Messkopf weitet das polychromatische Licht der Punktquelle in ein Kontinuum von monochromatischen Abbildungen auf. Die einzelnen Fokuspunkte sind aufgrund der chromatischen Aberration räumlich verteilt, d. h. sie befinden sich in unterschiedlichen Entfernungen zum Messkopf entlang der optischen Achse. Anschließend erfolgt die Reflexion aller Lichtanteile an der zu vermessenden Oberfläche. Das Licht der Wellenlänge, deren Brennpunkt sich bei idealisierter Betrachtung exakt auf der Oberfläche befindet, gelangt durch die Faseroptik und passiert einen Ortsfilter. In der Realität handelt es sich um Licht mit einem endlichen Wellenlängenbereich, das mithilfe eines Spektrometers ausgewertet wird. Aus der Wellenlänge mit maximaler Lichtintensität im Spektrum kann über eine spezifische Kalibrierkurve auf den Abstand zwischen Messkopf und reflektierender Oberfläche geschlossen werden.

Beim Auftreten mehrerer Reflexion, etwa an Film- und Wandoberfläche, kann aus der Differenz der jeweiligen Wellenlängen mit maximaler Lichtintensität im Spektrum des reflektierten Lichtes die Filmdicke berechnet werden. Dabei ist die optische Dichte des Filmmediums durch Multiplikation mit dem Brechungsindex der Flüssigkeit zu berücksichtigen [195].

3.6.5 Laser Focus Displacement

Ein Messverfahren unter Nutzung eines Laser Focus Displacement Meters (LFDM) wurde erstmals durch TAKAMASA zur Bestimmung von Filmdicken an einer senkrechten Platte [196] sowie in transparenten Rohren [197] beschrieben. Das Messprinzip basiert auf der Fokussierung bzw. Defokussierung eines Laserlichtkegels auf einer reflektierenden Phasengrenzfläche

zwischen Medien mit unterschiedlicher optischer Dichte. Abbildung 3.15 zeigt den optischen Aufbau eines LFDM-Messsystems. Zu verschiedenen Zeitpunkten innerhalb eines Messzyklus ergeben sich unterschiedliche optische Pfade. Die Fokuslinse wird über einen elektrisch angeregten Piezokristall in Schwingungen versetzt, wodurch die Fokusposition innerhalb eines bestimmten abzutastenden Messbereiches variiert. Reflektiertes Licht gelangt mithilfe eines Strahlteilers durch eine Lochblende zu einem lichtempfindlichen Sensorelement. Wenn sich der momentane Fokusabstand exakt auf einer reflektierenden Oberfläche befindet, wird eine hohe Lichtintensität detektiert. Unter Kenntnis von Oszillationsfrequenz und maximaler Abstandsvariation des Fokuspunktes kann aus der Phasenverschiebung des Intensitätsmaximums der Abstand des Sensors zur Oberfläche berechnet werden.

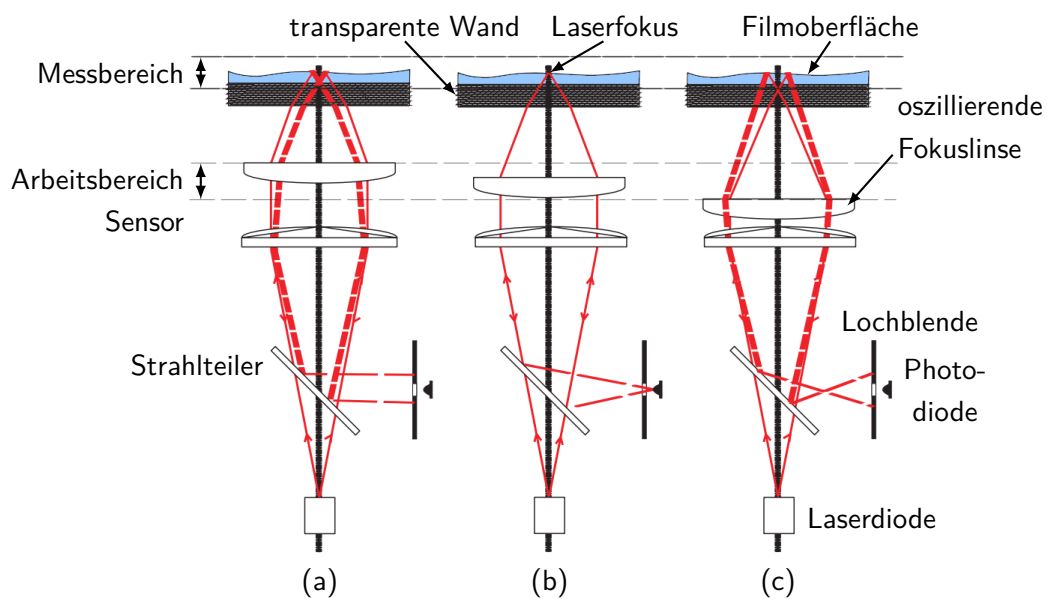


Abbildung 3.15: Optischer Aufbau eines LFDM zur Filmdickenmessung, Fokuspunkt oberhalb (a), übereinstimmend mit (b), unterhalb (c) der Filmoberfläche, nach [4]

Liegen sowohl Film- als auch Wandoberfläche innerhalb des Fokusbereiches, kommt es während einer Schwingungsperiode zu zwei Maxima in der gemessenen Lichtintensität. Die direkte Methode ermittelt die Filmdicke aus der Differenz der jeweiligen Phasenverschiebungen. Alternativ kann für die indirekte Methode eine Kalibrationsmessung durchgeführt werden. Als Referenz wird ein gemessener Nullabstand zur trockenen Wandoberfläche definiert, sodass sich die Filmdicke aus der Differenz zwischen Nullabstand und gemessenem Abstand zur Filmoberfläche ergibt [196].

Zahlreiche weitere Autoren haben sich daraufhin mit dem Einsatz von LFDM-Ausführungen mit unterschiedlichen Messbereichen und Arbeitsabständen beschäftigt [4, 9, 198–202]. Aufgrund von Brechungseffekten ist die direkte Methode der Filmdickenbestimmung nur für Filmdicken $\delta > 50 \mu\text{m}$ anwendbar. Darunter sind die Peaks der reflektierten Wellenlängen nicht mehr voneinander unterscheidbar [200, 201]. Ein anderes Problem tritt bei der Untersuchung welliger Filme auf. Aufgrund der Oberflächenkrümmung kommt es zu Reflexionseffekten, die Signalausfälle verursachen [200]. Weiterhin treten ähnliche Phänomene allgemein

für nicht-glatte Filmoberflächen auf, insbesondere bei überkritischer Filmströmung mit Tropfenabriss. Durch den Einfluss hoher Drücke werden die Störungen noch weiter verstärkt. Insgesamt können Filmdicken ab etwa $1\text{ }\mu\text{m}$ vermessen werden. Die Messdaten werden teilweise mit einer Frequenz von bis zu $1,5\text{ kHz}$ und einer Dickenauflösung im Submikrometerbereich aufgezeichnet [4].

3.6.6 Lasertriangulation

Die Anwendung von Verfahren auf Grundlage von Lasertriangulation ist vorwiegend im Bereich der Distanzmessung [203–205] sowie der Dickenmessung fester transparenter Schichten dokumentiert [206]. Speziellere Untersuchungen beschäftigen sich mit flüssigen Wasserfilmen bzw. darauf schwimmenden Ölschichten [207, 208].

Das Messprinzip der Lasertriangulation wird in Abbildung 3.16 veranschaulicht. Die Laserdiode erzeugt einen monochromatischen Strahl, typischerweise im sichtbaren Wellenlängenbereich. Die Fokuslinse fokussiert den Lichtstrahl in einem bestimmten Abstand vom Messkopf. Befindet sich eine Oberfläche innerhalb des Messbereiches, wird das abgestrahlte Licht über die Bildlinse auf einen Detektor abgebildet. Die genaue Position der Abbildung wird durch den Abstand der Oberfläche zum Sensor bestimmt. Die Arbeitsweise von Lasertriangulationssensoren kann auf die Detektion von diffusem Streulicht oder direkt reflektiertem Licht abgestimmt werden [209]. Für die letztere Variante sind insbesondere Ausrichtung und Fixierung des Sensors in einem definierten Winkel zur Oberfläche entscheidend.

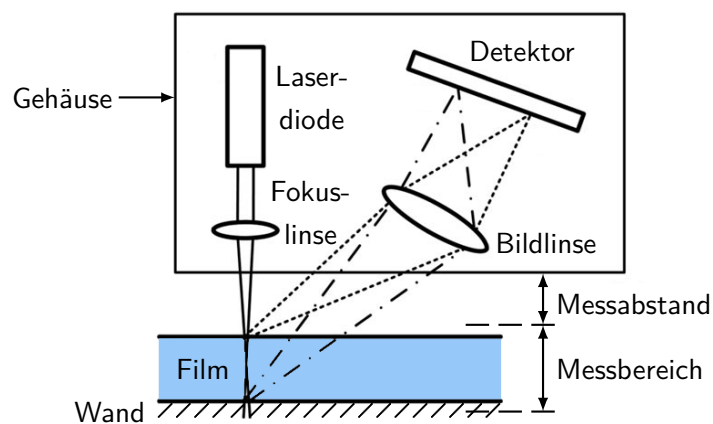


Abbildung 3.16: Messprinzip eines Lasertriangulationssensors, Arbeitsweise mit Streulicht, nach [206]

Eine Methode der Filmdickenbestimmung besteht in der Bildung der Differenz zwischen den zwei gleichzeitig gemessenen Abständen zu Film- sowie Wandoberfläche. Ein jeweils ausreichend starkes Messsignal ist dafür erforderlich. Alternativ kann eine Referenzmessung des Wandabstandes im trockenen Zustand durchgeführt werden. Die Filmdicke entspricht der Differenz dieses Nullabstandes zum gemessenen Abstand der Filmoberfläche.

Über die konkrete Auslegung der Optik wird die laterale Auflösung eines Triangulationsverfahrens bestimmt. Je kleiner der Lichtpunkt ist, der auf der zu vermessenden Oberfläche entsteht, desto besser. Befindet sich die Fläche exakt im Fokusabstand, ist der minimale

Durchmesser erreicht. Mit zunehmender Defokussierung eines Messobjektes vergrößert sich der Lichtpunkt, bedingt durch die Form der Strahltaile, die von der Fokuslinse erzeugt wird. Dies gilt sowohl für Abweichungen in positiver als auch in negativer Richtung entlang der optischen Achse. Die laterale Auflösung ist demnach in der Mitte des Messbereiches am besten und nimmt zu den Rändern hin stetig ab [206].

Die Konstruktion der Optik bestimmt neben der lateralen Auflösung außerdem den individuell abdeckbaren Messbereich eines Triangulationssensors. Zahlreiche unterschiedliche Kombinationen von Bezugsabstand und Messbereichsgröße sind möglich und werden von den Herstellern angeboten. Minimal messbare Filmdicken werden im Bereich $\delta \approx 1 \mu\text{m}$ angegeben [209].

3.7 Laserinduzierte Fluoreszenz

Die Nutzung von laserinduzierter Fluoreszenz (LIF, Laser-induced Fluorescence) stellt eine Variante der optischen Messverfahren zur Filmdickenbestimmung dar, die bereits in zahlreichen Arbeiten erforscht und weiterentwickelt wurde [65,156,210–226]. Fluoreszenz bezeichnet die spontane Emission von Strahlung kurz nach Anregung durch elektronische Übergänge. Das emittierte Licht besitzt eine größere Wellenlänge als die ursprüngliche Anregung [223]. Bei LIF-Verfahren wird der Film durch eine intensive Lichtquelle bestrahlt. Die Flüssigkeit absorbiert einen Teil der Lichtenergie. Bei Vorhandensein fluoreszierender Stoffe im Fluid tritt Fluoreszenz auf. Der Zusammenhang zwischen Flüssigkeitsmenge auf der Oberfläche und Fluoreszenzstärke kann in Form von Kalibrierkurven bestimmt werden. Auf diese Weise kann die vorliegende Filmdicke aus einem gemessenen Fluoreszenzsignal abgeleitet werden.

Eine der ersten Möglichkeiten zur intensiven Bestrahlung bestand in der Verwendung einer Quecksilberdampfampe [65]. Die Verwendung eines Lasers zur Anregung der Fluoreszenz ist der Ursprung für die Bezeichnung LIF. Beispielsweise Argon-Ionen-Laser [210,211], Nd:YAG-Laser [219,220,222,225], Nd:YLF-Laser [224] oder Nd:YAlO₃-Laser [217] kommen dabei zum Einsatz. Das Schema eines typischen Versuchsaufbaus ist in Abbildung 3.17 dargestellt.

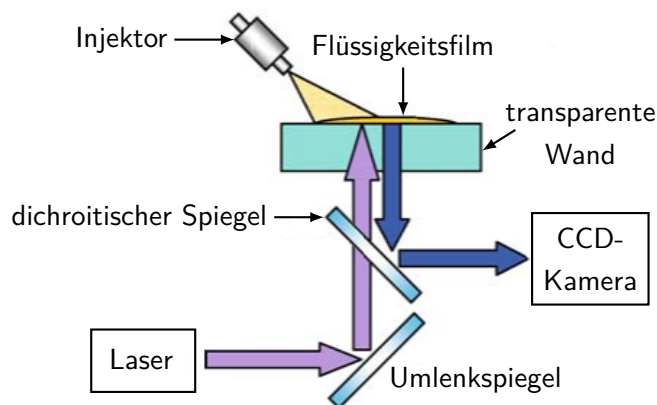


Abbildung 3.17: Schematischer Versuchsaufbau zur Filmdickenbestimmung mithilfe von LIF, nach [219]

Als allgemeine Voraussetzung für die Anwendung der LIF-Methode muss ein Stoff in der Flüssigkeit vorhanden sein, der Fluoreszenz ermöglicht. Dieser wird als Tracer bezeichnet. Native Bestandteile der Flüssigkeit können als Fluoreszenzgeber fungieren. Meist jedoch werden fluoreszierende Farbstoffe hinzugegeben, um einen spezifischen Wellenlängenbereich einzustellen, in dem die Fluoreszenz auftritt. Ein Überblick sowie umfangreiche weiterführende Literatur zu den unterschiedlichen Tracer-Arten ist in [218] zusammengestellt. Die Auswahl eines geeigneten Tracers kann im konkreten Anwendungsfall eine Herausforderung darstellen. Idealerweise muss dieser für ein starkes Fluoreszenzsignal sorgen, gleichzeitig aber eine gute Proportionalität zwischen Konzentration und Filmdicke über den gesamten Messbereich aufweisen sowie unempfindlich gegenüber Temperatur- und Druckänderungen sein. Eine Übereinstimmung mit der untersuchten Flüssigkeit hinsichtlich diverser Stoffeigenschaften wie Oberflächenspannung, Verdampfungsrate, Konvektions- und Diffusionsvermögen sowie Viskosität ist darüber hinaus von entscheidender Bedeutung. In der Praxis erfüllt der Tracer meist nicht alle genannten Anforderungen [222].

Für Mehr-Komponenten-Treibstoffe wie Benzin werden häufig Mischungen aus einem fluoreszierenden Tracer, z. B. Toluol oder 3-Pentanon bei Anregung im UV-Bereich, und einem nicht-fluoreszierenden Ersatzkraftstoff, z. B. Isooktan, verwendet [213, 221, 222, 226]. Insbesondere für das Verdampfungsverhalten zeigt sich bei dieser Art von Ersatzkraftstoffmischungen keine ausreichende Vergleichbarkeit mit Benzin. Eine Übertragung der Ergebnisse auf Realkraftstoffe ist daher meist schwierig. Alternativ kann dem realen Kraftstoff ein sehr stark fluoreszierender Tracer in entsprechend geringer Menge zugegeben werden [217]. Der Vorteil besteht darin, dass die Eigenschaften des zu untersuchenden Realkraftstoffes dadurch weitestgehend unverändert bleiben. Insbesondere bei dickeren Filmen jedoch sind Sättigungseffekte teilweise nicht vernachlässigbar und führen zu Nichtlinearitäten in der Abhängigkeit zwischen Filmdicke und Fluoreszenzintensität [215]. Weiterhin zeigt ein zugesetzter Fluoreszenzfarbstoff im Allgemeinen kein ko evaporatives Verhalten [216], sodass die Farbstoffkonzentration in verdampfenden Systemen kontinuierlich zunimmt.

Unter Zuhilfenahme geeigneter optischer Hilfsmittel ist es möglich, eine flächige Beleuchtung des Flüssigkeitsfilmes zu erzeugen. Mithilfe einer CCD-Kamera kann die Verteilung der Filmdicke über der beleuchteten Fläche sowohl zeitlich als auch räumlich aufgelöst werden [156, 223]. Die unbeabsichtigte Beleuchtung von Bereichen oberhalb des Flüssigkeitsfilmes verursacht störende zusätzliche Fluoreszenzsignale, sodass die gemessene Fluoreszenzintensität nicht mehr ausschließlich im Zusammenhang mit den Emissionen des Filmes steht. Durch die Einkopplung des Anregungslichtes über eine transparente Wand können die Auswirkungen derartiger Effekte reduziert werden [171, 222, 223]. An der Grenzfläche zwischen Wand und umgebender Gasphase tritt ab einem bestimmten Einfallswinkel innere Totalreflexion auf. Trifft das Licht hingegen aus der Wand auf die Flüssigphase, findet keine Reflexion statt, sondern es kommt zur Auskopplung in den Film hinein.

Eine spezielle Variante bzw. Verbesserung der LIF stellt die in [214] beschriebene ERLIF-Methode (Emission Reabsorption LIF) dar. Anstelle eines einzelnen Fluoreszenz-Tracers werden dabei zwei verschiedene Farbstoffe verwendet, deren Absorptions- und Emissions-

spektren aufeinander abgestimmt sind, siehe Abbildung 3.18. Überlappungen der Emissionswellenlänge des einen Farbstoffes mit dem Absorptionsspektrum des anderen werden gezielt genutzt. Der zweite Farbstoff emittiert seinerseits wiederum Licht auf einer anderen Wellenlänge. Durch die Bildung des Verhältnisses zwischen den beiden Fluoreszenzsignalen werden die Messungen unempfindlich gegenüber Reflexionseffekten und Schwankungen der Anregungslichtstärke. Minimale Filmdicken bis zu $5\text{ }\mu\text{m}$ können mit hoher Genauigkeit bestimmt werden. Durch die Notwendigkeit der Detektierung und Auswertung zweier verschiedener Wellenlängen erhöht sich jedoch die Komplexität des optischen Systems.

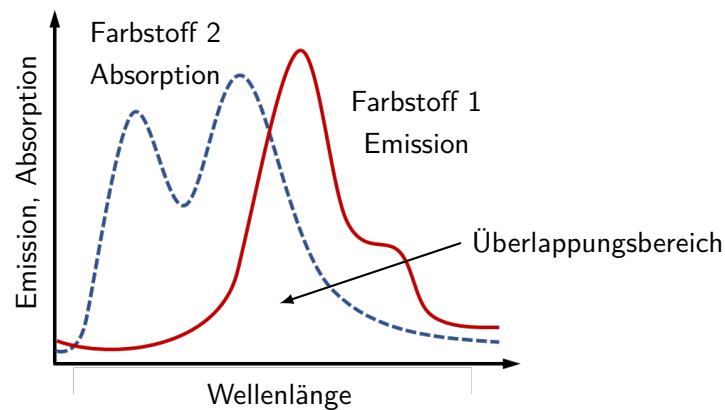


Abbildung 3.18: ERLIF-Methode, Überlappung des Emissionsspektrums des einen Farbstoffes mit dem Absorptionsspektrum des anderen, nach [214]

3.8 Refractive Index Matching

Die Ursprünge des RIM-Verfahrens (Refractive Index Matching, engl. etwa Abgleich des Brechungsindex) sind im Automobilbereich zu finden [227–229]. Die 2D-Vermessung von Filmdicken ist dort von großem Interesse, jedoch erwies sich die Anwendung von LIF-Methoden als herausfordernd. Hauptursache dafür sind die großen Temperaturschwankungen im Verlauf eines Motorzyklus, die das stark temperatur- und druckabhängige Fluoreszenzsignal beeinflussen. Beim RIM liegt keine derartige Empfindlichkeit vor. Die Methode ermöglicht die Vermessung sehr dünner flüssiger Wandfilme. Details und weiterführende Literatur sind in [230] zu finden.

Das Messprinzip beim RIM basiert auf den Streueigenschaften einer rauen Oberfläche, die sich durch die Benetzung mit Flüssigkeit verändern. Klassischerweise kommt ein Glaskolben mit angerauhter Oberfläche zum Einsatz. An der Grenzfläche zwischen rauher Glasoberfläche und umgebender Gasphase tritt eine ausgeprägte Lichtstreuung auf. Ein Injektor erzeugt typischerweise ein feines Spray aus Flüssigkeitstropfen, die den Kolben in Form eines Filmes benetzen. Bei nahezu identischen Brechungsindizes von Flüssigkeit und Glas reduziert sich mit zunehmender Filmdicke der an der Grenzfläche gestreute Lichtanteil [230]. Das Messprinzip kann ebenfalls an rauen Metalloberflächen genutzt werden [58]. Abbildung 3.19 verdeutlicht die zugrundeliegenden physikalischen Effekte. Vereinfacht for-

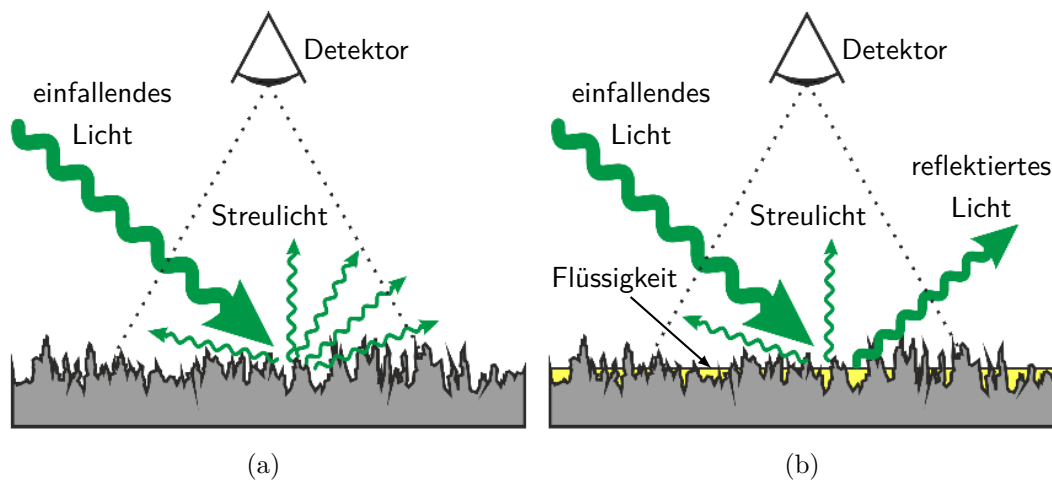


Abbildung 3.19: Physikalisches Prinzip bei der Anwendung des RIM, hoher Streulichtanteil bei trockener Oberfläche (a), hoher Reflexionsanteil bei Benetzung mit Flüssigkeit (b), nach [58]

mulierte dient der gestreute Lichtanteil als Maß für die Füllhöhe der benetzenden Flüssigkeit in den Oberflächenrauigkeiten. Nach Durchführung einer entsprechenden Kalibrierung kann die Filmdicke auf der Oberfläche gemessen werden.

Es existieren spezielle Arbeiten zu Diesel- [231] sowie Benzin-Sprays [232]. Durch eine Beheizung der Oberfläche kann das Verdampfungsverhalten von Wandfilmen nach dem Sprayaufprall untersucht werden [58]. Der Messbereich des RIM ist auf Filmdicken von etwa $\delta < 10 \mu\text{m}$ beschränkt, abhängig von den Rauigkeiten der benetzten Oberflächen.

4 Erprobung an einem Strömungsprüfstand

4.1 Auswahl der Messtechnik

Zur Auswahl der Messtechnik für die Erprobung am Strömungsprüfstand wird das Anforderungsprofil der zu lösenden Messaufgabe definiert. Ausgehend davon wird die Eignung der in Kapitel 3 vorgestellten Messverfahren beurteilt. Die Definition der Messaufgabe ist mit einiger Unsicherheit verbunden, denn es ist nicht bekannt, in welchem Bereich sich die Dicke des zu vermessenden Flüssigkeitsfilmes bei den Versuchen am HBK-S genau befindet. Nicht zuletzt gibt diese Unkenntnis Anlass zur Durchführung der vorliegenden Untersuchungen.

Mie-Streulicht-Aufnahmen vom Ende der Mischstrecke bzw. am Brennkammereintritt legen die Vermutung nahe, dass auf den Innenwänden des Mischrohres typischerweise Filme mit Dicken bis maximal etwa $1000\text{ }\mu\text{m}$ auftreten könnten. Zur minimalen Filmdicke ist keine derartige Schätzung möglich. Das Verfahren sollte demzufolge die Möglichkeit bieten, auch sehr dünne Wandfilme zuverlässig zu detektieren.

Daher wird ein abzudeckender Messbereich von mindestens $50\text{--}1000\text{ }\mu\text{m}$ als Zielforderung festgelegt. Die axiale Auflösung soll die Messbarkeit von Filmdickenänderungen im Bereich von $\Delta\delta_{min} = 1\text{ }\mu\text{m}$ ermöglichen. Eine laterale Auflösung von $\Delta x = 100\text{ }\mu\text{m}$ oder besser sollte gegeben sein. Für eine ausreichende zeitliche Auflösung der welligen Filme wird eine Messdauer von 1 ms oder weniger angestrebt. Bei einer Messfrequenz oberhalb von etwa 1 kHz ist diese Anforderung erfüllt. Weiterhin ist eine möglichst hohe Genauigkeit der Messmethode erwünscht. Auf die Angabe eines expliziten Wertes wird an dieser Stelle verzichtet. In Tabelle 4.1 sind die Daten zu den beschriebenen Mindestanforderungen zusammengefasst.

Parameter		Anforderung
Messbereich		$50\text{--}1000\text{ }\mu\text{m}$
axiale Auflösung	$\Delta\delta_{min}$	$< 1\text{ }\mu\text{m}$
laterale Auflösung	Δx	$< 100\text{ }\mu\text{m}$
Messdauer	t_s	$< 1\text{ ms}$
Messfrequenz	f_s	$> 1\text{ kHz}$

Tabelle 4.1: Anforderungen an die gesuchte Messtechnik

Als Grundlage für eine differenzierte weitere Beurteilung der Verfahren werden zunächst die vorherrschenden Versuchsbedingungen genauer beschrieben. Die Erprobung erfolgt im Labor unter vereinfachten Bedingungen, verglichen mit dem HBK-S. In Tabelle 4.2 werden die Bedingungen gegenübergestellt. Im Laborversuch herrscht ein deutlich niedrigerer Umgebungsdruck. Der gleiche Trend gilt für die Vibrationen des Prüfstandes, die Temperatur der strömenden Luft sowie die Umgebungstemperaturen, denen das Messgerät ausgesetzt ist. Für die Laborversuche wird außerdem auf HEL verzichtet und stattdessen ausschließlich Wasser verwendet, um eine unkomplizierte Bereitstellung sowie gefahrlose Handhabung des Mediums zu gewährleisten.

	HBK-S	Laborversuch
Umgebungsdruck	15 bar	1 bar
Umgebungstemperatur	160–200 °C	20 °C
Temperatur der Luftströmung	600 °C	20 °C
Prüfstandsvibrationen	± 5 g	keine
Medium	HEL + Wasser	Wasser
maximale Luftgeschwindigkeit	100 m/s	40 m/s

Tabelle 4.2: Vergleich der Versuchsbedingungen am HBK-S und im Laborversuch

Im Gegensatz zum Laborversuch befindet sich am HBK-S über dem Film in der Mischstrecke ein Nebel aus verdampftem gasförmigem Brennstoff-Wasser-Gemisch und flüssigen Emulsionströpfchen. Ein Großteil der Tropfen entstammt den Zerstäubungsprozessen am Austritt des Injektors. Ein kleiner Anteil wird durch Tropfenreflexion an den heißen Wänden verursacht. Phänomene wie der LEIDENFROST-Effekt können ebenfalls dazu beitragen, vgl. Abschnitt 2.2. Ein weiterer Teil entsteht möglicherweise durch Tropfenabriss aus der Filmströmung, wenn diese sich aufgrund der hohen Strömungsgeschwindigkeiten der Luft von bis zu 100 m/s im überkritischen Bereich befindet, siehe Abschnitt 2.3.

Eine Übersicht zu den in Kapitel 3 erläuterten Messverfahren für Flüssigkeitsfilmdicken ist in Tabelle 4.3 dargestellt. Neben den Charakteristika der Verfahren wird ein Messbereich oder eine minimal messbare Filmdicke auf Grundlage der Literaturquellen in Kapitel 3 angegeben. Unter Berücksichtigung der beschriebenen Versuchsbedingungen wird nachfolgend die Eignung der Verfahren im Einzelnen beurteilt.

Nadelkontakt. Messungen unter Anwendung des Nadelkontaktverfahrens sind prinzipbedingt mit einer unerwünschten Störung des Filmes und der umgebenden Strömung verbunden. Weiterhin können nur ruhende Filme mit einer ausreichenden Genauigkeit vermessen werden. Dynamische Phänomene wie Wellen auf der Flüssigkeitsoberfläche lassen sich nicht auflösen, wodurch dieses Verfahren ausscheidet.

Elektrische Leitfähigkeit/Kapazität. Auch elektrische Leitfähigkeits- sowie Kapazitätsmethoden arbeiten im Allgemeinen nicht berührungsfrei. Die Einbettung von Elektroden in

Messverfahren	Charakteristikum	MB [μm]
Nadelkontakt	Störung von Film- und Luftströmung	min. 50
Elektrizität		
Leitfähigkeit	Störung von Film- und Luftströmung	10–6000
Kapazität	Kapazitätsbestimmung kritisch	10–5000
Ultraschall	kein optischer Zugang notwendig	
Laufzeitmethode		min. 50
Resonanzmethode		0,03–150
Strahlungsdämpfung	Querschnittsmittelwert	
Mikrowellen		400–1000
Hochenergiestrahlung		—
Lichtabsorption	Farbstoff zur Absorptionssteigerung	min. 25
Lichtreflexion	Filmoberflächenneigung tendenziell kritisch	
Äußere Reflexion	wellige Filme problematisch	50–2000
Innere Reflexion	zeitliche Auflösung sehr begrenzt	25–6000
Interferometrie	enger individueller Messbereich	0,1–1000
Chromatisch-konfokal	Auflösung im Nanometerbereich	min. 1
Laser Focus Displacement	hohe Auflösung und Genauigkeit	min. 1
Lasertriangulation	sehr kurze Messdauern möglich	min. 1
Laserinduzierte Fluoreszenz	Fluoreszenzfarbstoff	min. 5
Refractive Index Matching	rauhe Oberfläche notwendig	0,1–10

Tabelle 4.3: Übersicht verschiedener Messverfahren für Flüssigkeitsfilmdicken, Spalte MB in Bezug auf dokumentierte Filmdicken der Literatur in Kapitel 3, zur Erprobung ausgewählte Verfahren gelb markiert

die Filmlaufläche beeinflusst bzw. stört die Wandfilmströmung und verursacht einen hohen konstruktiven Aufwand. Insbesondere im Hinblick auf den Austausch von verschlissenen Komponenten ist eine derartige Integration der Messtechnik in den Prüfstand unerwünscht.

Ultraschall. Der Einsatz von Ultraschall-Transducern zur Filmdickenbestimmung stellt eine besonders interessante Option dar, da kein optischer Zugang zum Flüssigkeitsfilm notwendig ist. So sind beispielsweise Messungen durch Metallwände hindurch möglich. Die Anwendung der Resonanzmethode zur Messung dünner Filme im Bereich $\delta < 25 \mu\text{m}$ ist bisher lediglich für Filme dokumentiert, die zwischen zwei metallischen Schichten eingeschlossen sind. Das Messverfahren und die entsprechenden Auswertalgorithmen müssten für den vorliegenden Anwendungsfall zur Vermessung von Flüssigkeitsfilmen auf freien Oberflächen weiterentwickelt werden. Dies ist im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich.

Strahlungsdämpfung. Für Verfahren, die auf der Dämpfung von Mikrowellen- oder Hochenergiestrahlung beim Durchgang durch einen Film basieren, sind keine Messungen von Filmdicken unter 400 μm dokumentiert. Des Weiteren ist die laterale Auflösung vergleichsweise schlecht, da lediglich eine mittlere Filmdicke im durchstrahlten Querschnitt bestimmt werden kann. Für die lokale Untersuchung von Filmen sind solche Verfahren demnach prinzipiell nicht geeignet.

Lichtabsorption. Zur Bestimmung der Dicke eines Filmes aus der Differenz zwischen Lichtintensität vor und nach dem Durchgang durch diesen ist eine hohe Absorptionsfähigkeit des Mediums für die betreffende Lichtwellenlänge notwendig. Je größer der absorbierte Lichtanteil ist, desto niedriger ist die minimal detektierbare Filmdicke, die dem kleinsten messbaren Unterschied zwischen ein- und ausfallender Strahlungsintensität entspricht. Die Absorptionsfähigkeit der Filmflüssigkeit kann mithilfe von speziellen Farbstoffen erhöht werden. Die Zugabe eines Farbstoffes ist jedoch mit ungewollten Nebeneffekten verbunden. Bei einer Emulsion aus HEL und Wasser etwa besteht jeweils eine unterschiedliche Löslichkeit des Farbstoffes. Weiterhin handelt es sich aufgrund der heißen Wände am HBK-S um ein verdampfendes System. Im Laufe der Zeit kommt es zu Farbstoffablagerungen an den Wänden, die das optische Messverfahren stören. Die Verunreinigung von Prüfstandskomponenten durch den Einsatz von Farbstoffen ist daher prinzipiell unerwünscht, insbesondere wenn parallel weitere Messtechnik betrieben wird. Der Aufbau einer Messstrecke für die Anwendung des Lichtabsorptionsprinzips erfordert zudem einige Erfahrung im Umgang mit den benötigten optischen Komponenten. Der voraussichtliche zeitliche Aufwand zur Installation eines entsprechenden Messsystems wird für diese Arbeit als zu hoch eingeschätzt, denn es existiert kein fertiges kommerziell verfügbares Messsystem.

Eine weitere Herausforderung ergibt sich aus den Versuchsbedingungen am HBK-S. Bei Anwendung des klassischen Durchlichtverfahrens trägt der Nebel aus Tröpfchen über dem Flüssigkeitsfilm ebenfalls zur Absorption des Lichtes bei. Zur Vermeidung der daraus resultierenden Verfälschung der Intensitätsmessungen muss der optische Zugang auf die Rückseite der transparenten Filmlaufläche beschränkt werden. Bei senkrechter Einstrahlung auf die Phasengrenze am Übergang von der flüssigen in die Gasphase wird nur ein geringer Anteil reflektiert. Im Vergleich zum Durchlichtverfahren sinkt die Signalstärke ab. Diese kann durch eine Erhöhung des Reflexionsgrades an der Grenzfläche gesteigert werden. Dazu muss die Lichtquelle in einem möglichst flachen Winkel zur Filmoberfläche ausgerichtet werden. Der Winkel des ausfallenden Lichtstrahles sowie der Reflexionsgrad ändern sich jedoch mit der Neigung der Filmoberfläche. Beim Auftreten von Wellen sind die Schwankungen der Lichtintensität nicht mehr ausschließlich auf Änderungen der Filmdicke zurückzuführen.

Laserinduzierte Fluoreszenz. Für die Nutzung von laserinduzierter Fluoreszenz zur Filmdickenbestimmung ergeben sich ähnliche Herausforderungen wie für die zuvor diskutierten Lichtabsorptionsverfahren. Ein vorgefertigtes Messsystem ist nicht kommerziell verfügbar und müsste selbst entwickelt bzw. aufgebaut werden. Messungen mit der Durchlichtmethode würden durch den Tropfennebel am HBK-S gestört. Die Verwendung eines Fluoreszenzfarbstoffes ist mit den oben genannten unerwünschten Nebeneffekten verbunden. Bei Verzicht

auf die Zugabe von Farbstoffen ist die Eignung vorhandener Bestandteile der Filmflüssigkeit als Tracer erforderlich. Bei einigen Kraftstoffen kann durch Anregung im UV-Bereich eine Fluoreszenz der darin enthaltenen polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAH) ausgelöst werden. Speziell in Bezug auf die Laborversuche mit Wasser besteht eine solche Möglichkeit jedoch nicht. Insgesamt sind LIF-Methoden nicht für die vorliegenden Untersuchungen geeignet.

Refractive Index Matching. Die Verwendung von RIM erfordert eine raue Oberfläche, deren Streuungseigenschaften sich bei Benetzung mit Flüssigkeit ändern. Die erreichbaren Rauigkeitshöhen sind vergleichsweise klein, sodass lediglich die Vermessung von Filmdicken im niedrigen zweistelligen Mikrometerbereich möglich ist. Für die zu untersuchenden Filme ist dies nicht ausreichend, wodurch die Methode nicht weiter in Frage kommt.

Äußere/Innere Reflexion. Die Methoden unter Nutzung der äußeren oder inneren Reflexion von Licht an der Filmoberfläche ermöglicht die Messung von Filmdicken ab etwa $\delta = 25 \mu\text{m}$. Die Anwendung erweist sich jeweils als prinzipiell problematisch, sobald es zu Wellenbildung kommt. Da die zu untersuchenden schubspannungsgetriebenen Filme typischerweise wellig sind, sind die Verfahren für die vorliegende Messaufgabe nicht geeignet.

Interferometrie. Verschiedene Interferometrieverfahren decken insgesamt einen relativ großen Messbereich von etwa $0,1$ bis $1000 \mu\text{m}$ ab. Die definierte Mindestanforderung an den Messbereich wäre damit erfüllt. Jedoch sind die interferometrischen Sensoren im Einzelnen jeweils auf einen relativ engen Messbereich von wenigen $100 \mu\text{m}$ beschränkt, wodurch sie die Anforderungen nicht mehr erfüllen können.

Chromatisch-konfokale Methode. Durch die Verwendung eines chromatisch-konfokalen Sensors können laut Hersteller Filmdicken mit einer axialen Auflösung im zweistelligen Nanometerbereich, ausreichender lateraler Auflösung (Messpunktdurchmesser $12 \mu\text{m}$) und einer Messfrequenz von bis zu 70 kHz in einem Messbereich von etwa 25 – $2000 \mu\text{m}$ gemessen werden. Alle Mindestanforderungen sind demnach erfüllt. In der Literatur ist bisher keine konkrete Verwendung im geforderten Messbereich bzw. für hochdynamische wellige Filme dokumentiert, jedoch besitzt der ausgewählte Messkopf eine numerische Apertur von $0,5$. Für den Winkel der optischen Messachse zur Oberfläche ergibt sich demzufolge ein Toleranzbereich von bis zu $90 \pm 30^\circ$. Bei dem Messsystem handelt es sich um eine Komplettlösung, bestehend aus Sensoreinheit und Messkopf, für das sich die voraussichtlichen Kosten im verfügbaren Rahmen befinden. Weiterhin sind die Maße des Messkopfes geeignet für eine spätere Integration am HBK-S. Aus den genannten Gründen wird das chromatisch-konfokale Messsystem für die Erprobung ausgewählt.

Laser Focus Displacement. Der Einsatz eines Laser Focus Displacement Meters (LFDM) ermöglicht eine Auflösung im Submikrometerbereich (etwa $0,3 \mu\text{m}$) und eine Messfrequenz von ca. 1 kHz in einem Messbereich von 5 – $2700 \mu\text{m}$. Die Größe des entsprechenden Sensors bzw. Messkopfes übersteigt jedoch den am HBK-S verfügbaren Bauraum für die Integration der Messtechnik, weshalb diese Option verworfen wird.

Lasertriangulation. Die Bestimmung der Filmdicke mithilfe von Lasertriangulation liefert ausgehend von den Herstellerangaben Messwerte im Bereich 25–5600 μm mit einer axialen Auflösung von 1 μm , einer hohen lateralen Auflösung (Messpunktdurchmesser ca. 25 μm) und bis zu 392 kHz Messfrequenz. Die Kombination aus einem Messkopf mit integriertem Sensor und einer Anzeige- bzw. Steuereinheit bildet eine fertige Messlösung. Die Bauraumvorgaben können eingehalten werden und die veranschlagte Kostenspanne bewegt sich unterhalb des Limits. Dementsprechend wird der Lasertriangulationssensor ebenfalls für die experimentelle Erprobung ausgewählt.

Aufgrund der Beurteilung der möglichen Messverfahren wurden ein chromatisch-konfokaler Sensor (CKS) und ein Lasertriangulationssensor (LTS) für die Erprobung am Strömungsprüfstand ausgewählt. Zeichnungen von den Messköpfen sowie den jeweils vom Hersteller vorgesehenen Halterungen sind in Abbildung 4.1 dargestellt. Beim CKS handelt es sich um das Produkt der Firma Precitec Optronik, bestehend aus der kombinierten Sensor- und Steuereinheit CHRcodile 2 S und dem chromatisch-konfokalen Messkopf 5005126. Der Messkopf besitzt einen Außendurchmesser von 33 mm und eine Länge von 70 mm. Als Lichtquelle kommt eine weiße LED zum Einsatz. Der LTS wird von der Firma Keyence hergestellt. Das Messsystem besteht aus der Steuereinheit LK-G5001 und dem Messkopf LK-H022K mit integrierter Sensoreinheit. Die Maße des Messkopfes betragen $60 \times 62 \times 33,4$ mm. Der Laserstrahl wird mithilfe einer roten Laserdiode der Klasse 2 mit einer Wellenlänge von $\lambda = 650$ nm erzeugt. Ein Auszug der technischen Daten beider Systeme ist in Tabelle 4.4 zusammengefasst. Der Bezugsabstand gibt den Abstand vom Sensor zum Beginn des Messbereiches an. Die Messbereichsgröße verändert sich proportional mit dem Wert des Brechungsindex n des vermessenen Filmes. Die Angabe in der Tabelle gilt für transparente Schichten mit $n = 1$.

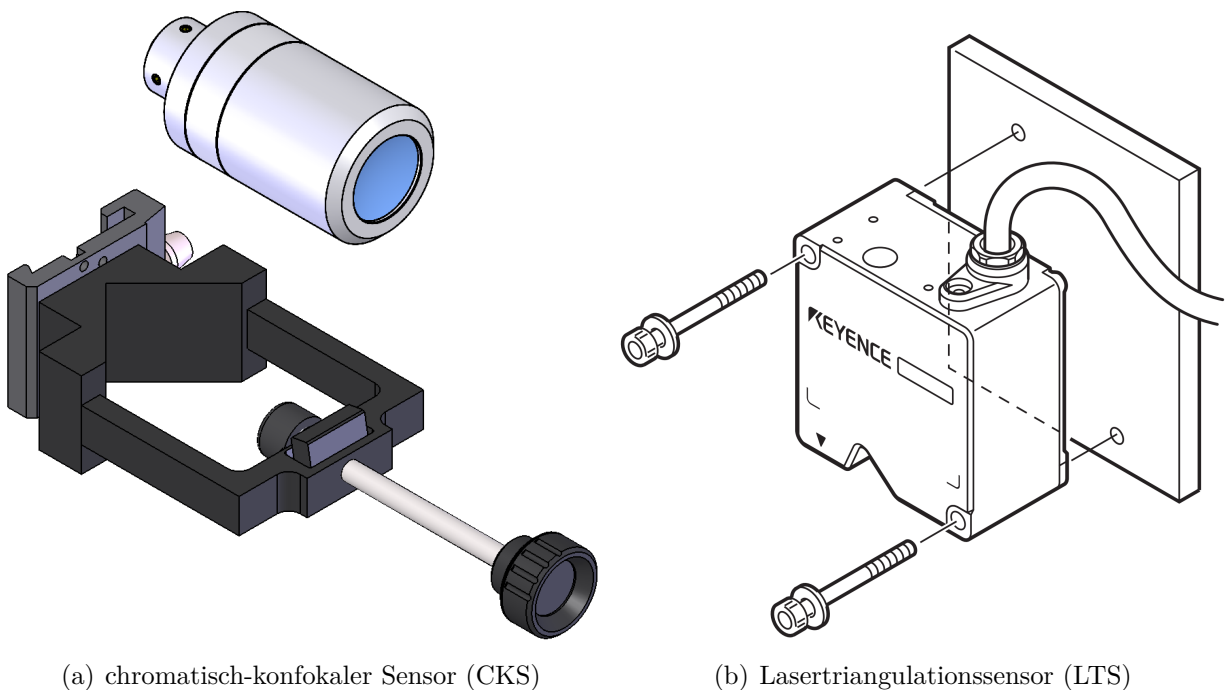


Abbildung 4.1: Zeichnungen von CKS und LTS, jeweils mit Halterung laut Herstellerempfehlung

	CKS	LTS
Hersteller	Precitec Optronik	Keyence
Steuergerät	CHRcodile 2 S	LK-G5001
Messkopf	5005126	LK-H022K
Abmessungen	$33 \times 33 \times 70$ mm	$60 \times 62 \times 33,4$ mm
Masse	220 g	230 g
Bezugsabstand (Beginn MB)	13,1 mm	13,3 mm
Messbereichsgröße ($n = 1$)	2,0 mm	5,6 mm
maximale Messfrequenz	20 kHz	392 kHz
Messpunktdurchmesser	12 μ m	25 μ m
axiale Auflösung	66 nm	1 μ m
Lichtquelle	weiße LED	rote Laserdiode
Leistung	20 W	0,95 mW

Tabelle 4.4: Auszug der technischen Daten von CKS [195] und LTS [209]

4.2 Versuchsaufbau

Für die Versuche zur Erprobung der ausgewählten Messtechnik wird ein Strömungsprüfstand benötigt, mithilfe dessen eine reproduzierbare Erzeugung von Flüssigkeitsfilmen unter definierten Randbedingungen möglich ist. Am Institut für Verbrennungstechnik (VT) des DLR Stuttgart wurde für diese Arbeit ein geeigneter Prüfstand entwickelt und aufgebaut, siehe Abbildung 4.2. Der Versuchsträger mit dem Strömungskanal (b) ist mithilfe eines Gestelles aus Profilstangen auf einem schwingungs isolierten optischen Labortisch montiert. Einschraubstutzen stellen die Schnittstellen für die Versorgung des Prüfstandes dar. Eine Wasserleitung (schwarz, Kunststoff) und zwei Leitungen für die Luftzufuhr (Metallschläuche) kommen zum Einsatz. Die für die Versuche verwendete Halterung des CKS ist in (a) zu erkennen. Es besteht eine Ähnlichkeit zu der Halterung aus Abbildung 4.1 (a). Der LTS wird entsprechend der Herstellerempfehlung in Abbildung 4.1 (b) durch zwei Schrauben auf einer Metallplatte fixiert. Die Halterung ist drehbar montiert, sodass der Winkel des Sensors über eine Stell-schraube eingestellt werden kann. Des Weiteren ermöglicht ein Dreiachs-Verschiebetisch die Positionierung in den Raumrichtungen. Schwarze Gummimatten dienen zur Ableitung des am Ende des Strömungskanales austretenden Wassers in einen Auffangbehälter, zu sehen in Abbildung 4.2 (c).

Einen Längsschnitt sowie die Vorderansicht des Versuchsträgers zeigt Abbildung 4.3. Der Strömungskanal hat eine Länge von $L = 202$ mm, eine Breite von $B = 84$ mm und eine Höhe von $H = 10$ mm. Auf einer Teilstrecke entlang des Kanales bildet jeweils eine Quarzglasplatte dessen obere und untere Begrenzung, sodass in diesem Bereich ein optischer Zugang für die Messtechnik gegeben ist. Die Quarzglasplatten sind auch in Abbildung 4.2 in der Unteransicht (a) und in der Draufsicht (b) zu erkennen.

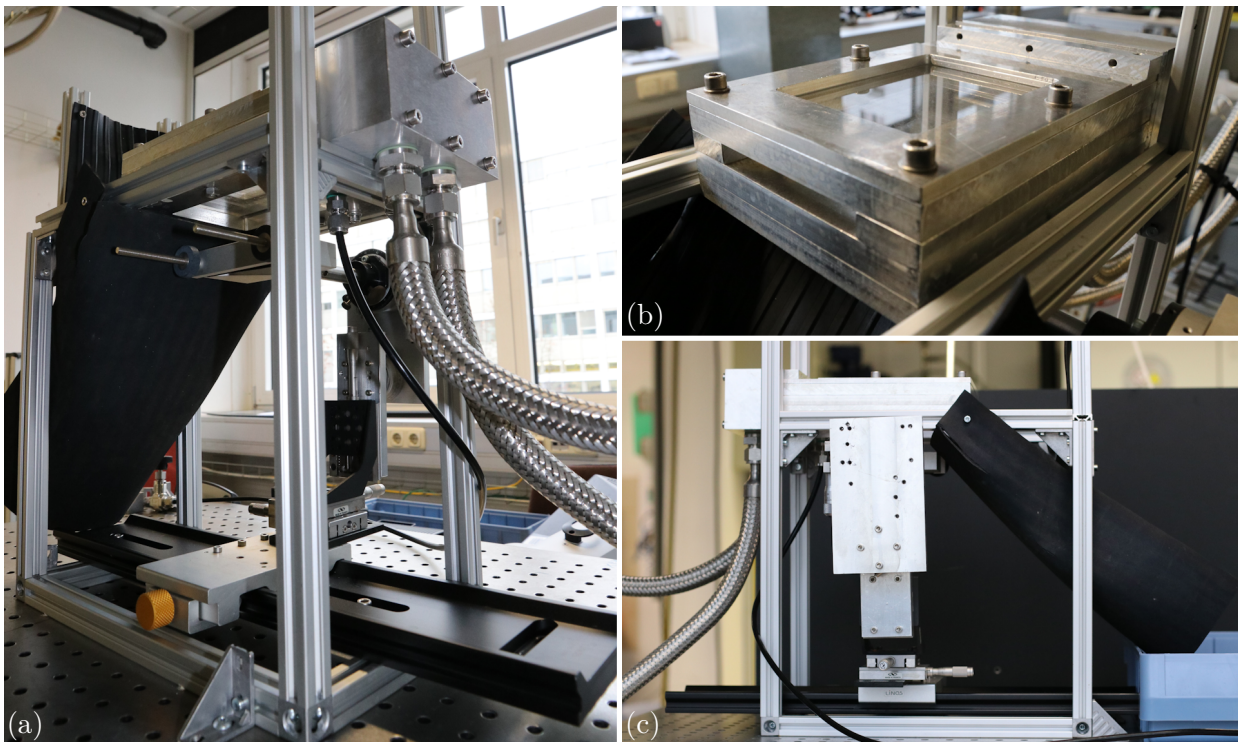


Abbildung 4.2: Generischer Strömungsprüfstand zur Erzeugung und Untersuchung von Wandfilmen unter Laborbedingungen; Unteransicht (a), Ansicht der Austrittsseite des Versuchsträgers (b), Seitenansicht (c)

Im Betrieb sammelt sich das zugeführte Wasser in einer Kammer und wird durch 158 Einzelbohrungen mit jeweils 0,3 mm Lochdurchmesser in den Kanal gedrückt. Die anliegende Druckluft gelangt durch die beiden Einschraubstutzen zunächst in ein Luftplenum und wird anschließend durch eine poröse Sinterplatte (Siperm R200, mittlere Porengröße 65 μm [233]) in den Strömungskanal eingeleitet. Durch die Interaktion von Luft und Wasser kommt es zur Bildung eines schubspannungsgetriebenen Wandfilmes, welcher durch die genannten Quarzglasscheiben hindurch optisch vermessen wird. Der Wassermassenstrom wird manuell über ein Handventil gesteuert und mithilfe eines Coriolis-Massendurchflussmessers gemessen.

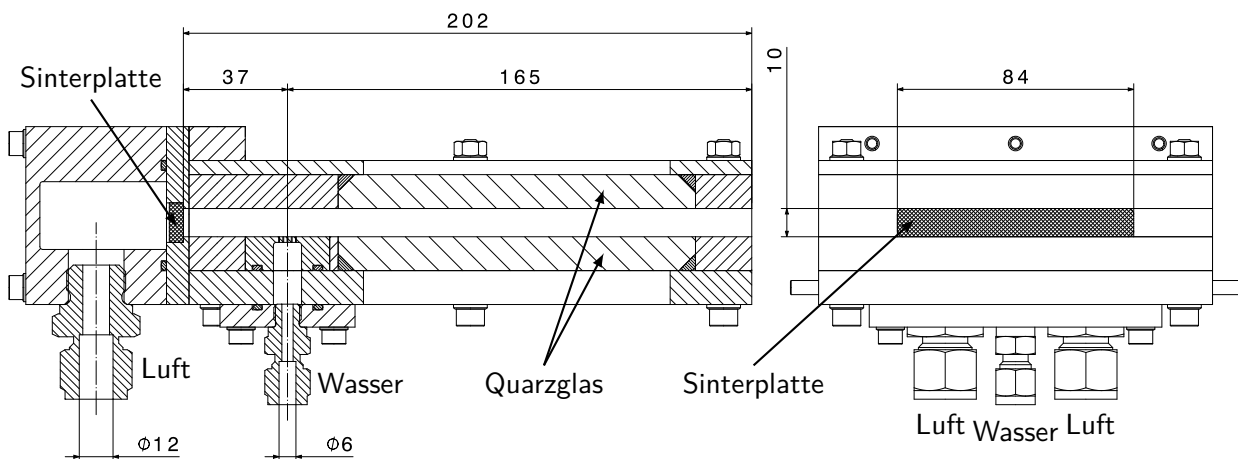


Abbildung 4.3: Abgesetzter Längsschnitt und Vorderansicht des Versuchsträgers, Maße in mm

Ein weiterer Massendurchflussregler stellt den Luftmassenstrom automatisiert nach Vorgabe der Luftgeschwindigkeit in einer Bedienerschnittstelle ein. Durch die Regelung der beiden Massenströme ist es möglich, unterschiedliche Betriebspunkte zu reproduzieren.

Um bei der Auswertung die Messdaten beider Sensoren miteinander vergleichen zu können, werden jeweils Messungen bei den in Tabelle 4.5 definierten Betriebspunkten durchgeführt. Die Filmdicke wird aus der Differenz zwischen gemessenem und Nullreferenzabstand durch Multiplikation mit dem Brechungsindex berechnet. Zur Überprüfung dieser Methode werden Deckgläser ($\delta = 170 \mu\text{m}$, $n = 1,5255$) vermessen. Mit beiden Sensoren ergeben sich Messwerte im Bereich $170 \pm 20 \mu\text{m}$, was aufgrund der Fertigungstoleranz als konsistent eingeschätzt wird. Für Wasserfilme wird der Brechungsindex $n_w = 1,33$ verwendet. Die Bestimmung der Nullreferenz stellt den ersten Betriebspunkt dar und erfolgt bei trockener, unbenetzter Quarzglasplatte. Anschließend können ruhende sowie wellige Wasserfilme vermessen werden. Letztere werden durch Variation der Luftgeschwindigkeit v_g bei konstanter Filmbeladung A_f erzeugt. Die Beladung des Filmes $A_f = \dot{V}_w / B$ ist dabei definiert als Quotient aus Volumenstrom des Wassers $\dot{V}_w = \dot{m}_w / \rho_w$ und Breite des Strömungskanales $B = 84 \text{ mm}$, wobei \dot{m}_w den Massenstrom und $\rho_w = 997 \text{ kg/m}^3$ die Dichte des Wassers bezeichnen.

Betriebspunkte	Glasoberfläche	A_f [mm^2/s]	v_g [m/s]
Nullreferenz	trocken	0	0
Ruhende Filme	benetzt	0	0
Wellige Filme	benetzt	120	5–40

Tabelle 4.5: Betriebspunkte für Vergleichsmessungen bei der Erprobung

4.3 Messdatenauswertung und Ergebnisse

Die Auswertung der Messdaten erfolgt anhand des zeitlichen Verlaufes der gemessenen Filmdicken bei den in Abschnitt 4.2 definierten Betriebspunkten. Zusätzlich gibt ein beistehendes Histogramm Aufschluss über die Häufigkeitsverteilung der dargestellten Filmdickenwerte, eingeteilt in Klassen von jeweils $1 \mu\text{m}$ Breite.

Als graphischer Referenzpunkt ist in allen Diagrammen bei $0 \mu\text{m}$ die Oberfläche der Quarzglasplatte definiert. Physikalisch befindet sich bei der Messung mit dem CKS die Glasoberfläche am unteren Ende des Messbereiches bei etwa 2 % des maximal messbaren Wertes. Für die Messungen mit dem LTS wurde die Glasoberfläche in der Mitte des Messbereiches positioniert. Diese Vorgehensweise ist nicht mit Einschränkungen bei der messbaren Filmdicke verbunden, weil der Messbereich des LTS um den Faktor 2,8 größer ist als der des CKS.

Neben der axialen Positionierung des Sensors ist die Einstellung des Winkels von entscheidender Bedeutung für die Stärke des Messsignales. Insbesondere der LTS reagiert bereits empfindlich auf Winkelabweichungen von wenigen Grad. Die Signalstärke des CKS kann

mithilfe der Software überwacht werden. Beim LTS gibt die Farbe einer in den Messkopf integrierten LED mit der Bezeichnung 'STABILITY' Auskunft über das am Sensor ankommende Signal. Die Signalqualität wird dabei vom Hersteller farblich in die drei Bereiche rot, gelb und grün eingeteilt.

Mit dem CKS sind Messungen mit ausreichender Signalintensität bei einer Abtastrate von 1 ms gerade noch möglich. Die Messwerte wurden dementsprechend mit einer Messfrequenz von 1 kHz aufgezeichnet. Beim LTS können deutlich niedrigere Abtastraten bis zu 0,01 ms erreicht werden. Eine Messfrequenz von 100 kHz wurde gewählt.

Nullreferenz. Die Durchführung der Nullreferenzmessung ergibt die in Abbildung 4.4 gezeigten Verläufe. Die Messdaten des CKS weisen eine Normalverteilung auf, die in einem Bereich von etwa $0 \pm 10 \mu\text{m}$ streut. Die Filmdickenhäufigkeiten bei den LTS-Daten lässt aufgrund der niedrigen Auflösung keine Rückschlüsse auf die Art der Verteilung zu. Der Streubereich ist mit Werten von $0 \pm 1 \mu\text{m}$ um einen Faktor 10 kleiner als beim CKS.

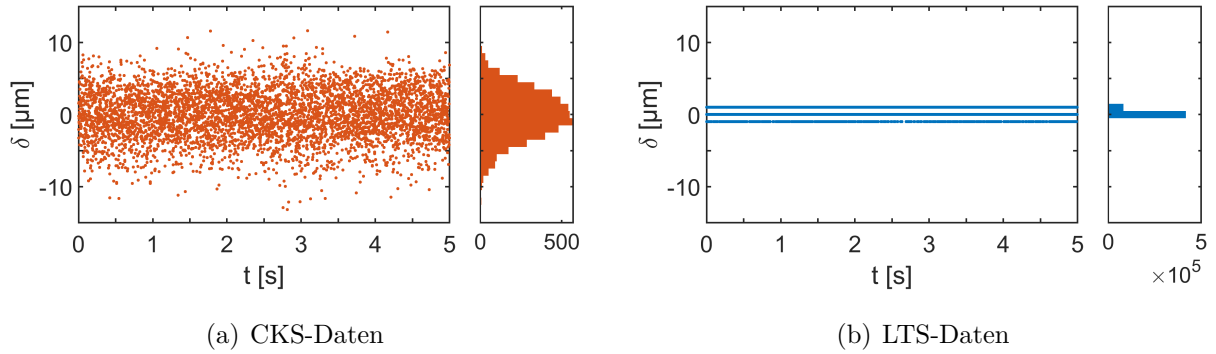


Abbildung 4.4: Nullreferenzmessung, trockene Glasoberfläche, $A_f = 0$, $v_g = 0$

Ruhende Filme. Die Ergebnisse der Vermessung eines ruhenden Filmes sind in Abbildung 4.5 dargestellt. Beide Sensoren zeigen übereinstimmend eine maximale Häufigkeit bei einer Filmdicke $\delta \approx 682 \mu\text{m}$. Beim CKS beträgt die Breite des Streubandes $6 \mu\text{m}$, beim LTS etwa $3 \mu\text{m}$. Der Unterschied in der Streubreite der Filmdicken ist damit nicht mehr so stark ausgeprägt wie bei der Nullreferenzmessung. Für beide Messsysteme gilt: Je näher sich die Messwerte zur Mitte des Messbereiches befinden, desto geringer ist deren Streuung.

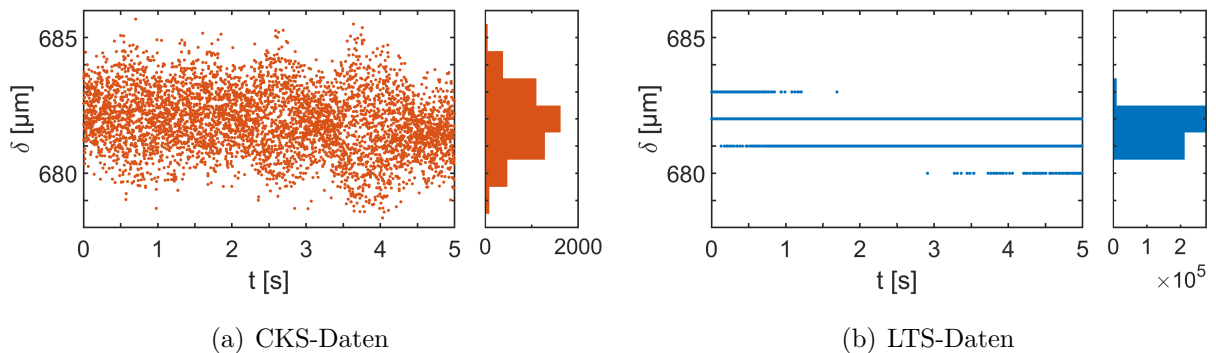


Abbildung 4.5: Vermessung eines ruhenden Wasserfilmes, benetzte Glasoberfläche, $A_f = 0$, $v_g = 0$

Wellige Filme. Eine Gegenüberstellung typischer Ergebnisse der Dickenmessung an welligen Wasserfilmen ist in Abbildung 4.6 dargestellt. Für die Messreihe wurde eine konstante Filmbeladung $\Lambda_f = 120 \text{ mm}^2/\text{s}$ gewählt, was einem Wassermassenstrom von $\dot{m}_w \approx 10 \text{ g/s}$ entspricht. Die maximale Geschwindigkeit der Luft beträgt $v_{g,max} = 40 \text{ m/s}$.

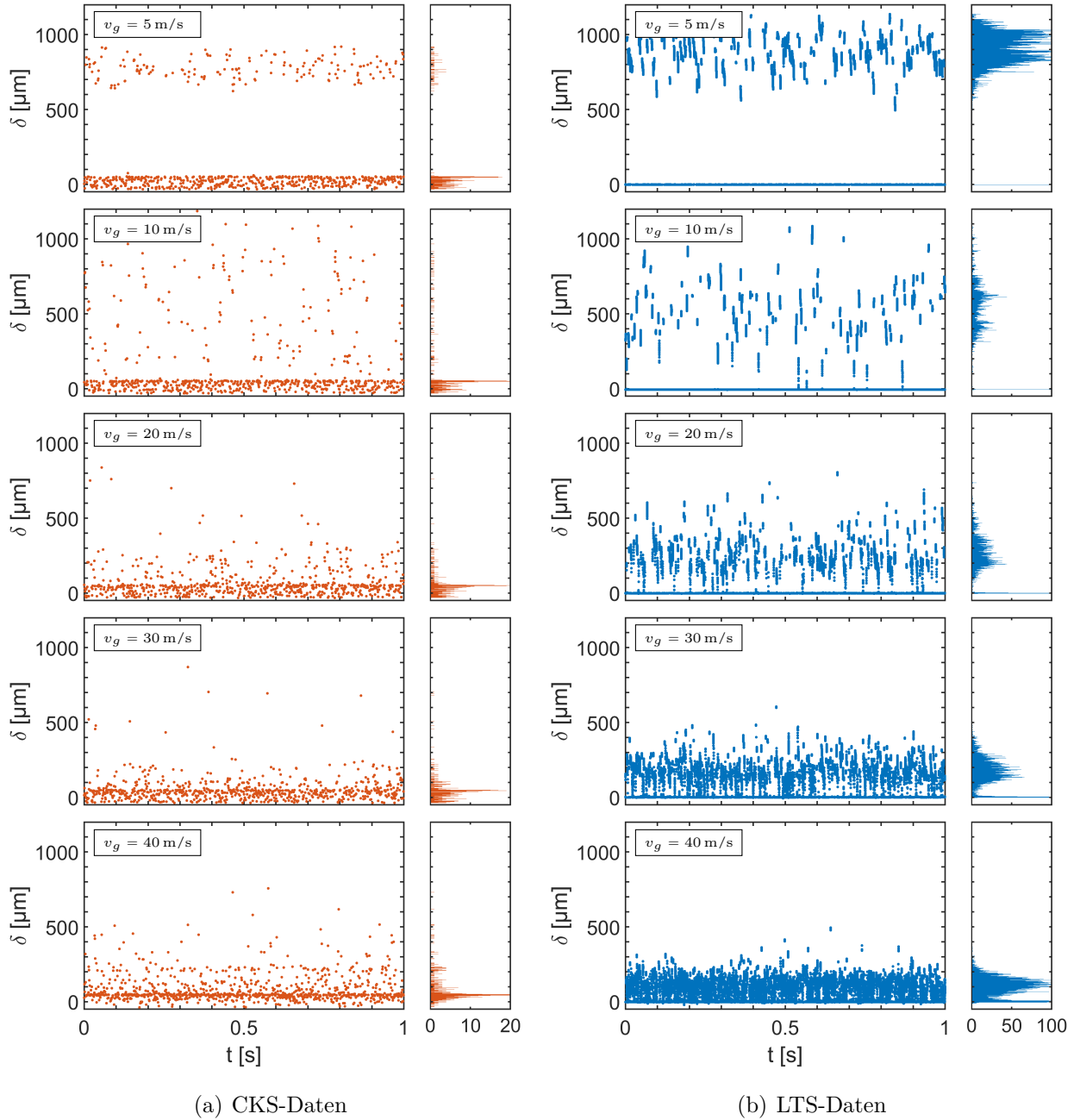


Abbildung 4.6: Untersuchung welliger Filme, $\Lambda_f = 120 \text{ mm}^2/\text{s} = \text{const.}$, $v_g = 5 \dots 40 \text{ m/s}$

Die Histogramme der CKS-Messdaten in Abbildung 4.6 (a) zeigen nicht die physikalisch zu erwartende Abhängigkeit der Filmdickenverteilung von der Luftgeschwindigkeit. Die Filmdicke mit der größten Häufigkeit liegt für alle Messungen bei ca. $50 \mu\text{m}$. Für die Messung bei $v_g = 5 \text{ m/s}$ sind einige Messpunkte im Bereich zwischen $600 \mu\text{m}$ und $900 \mu\text{m}$ zu erkennen. Diese decken sich relativ gut mit der entsprechenden LTS-Messung in (b). Bei höheren

Luftgeschwindigkeiten sind in (a) lediglich vereinzelte Messpunkte zu finden, die mit dem gemessenen Filmdickenbereich in (b) übereinstimmen. Ohne den Vergleich zum LTS können aus den dargestellten Messergebnissen des CKS im Allgemeinen keine zuverlässigen Aussagen über die tatsächlich vorliegende Dicke welliger Filme abgeleitet werden.

Der qualitative Verlauf der Histogramme in Abbildung 4.6 (b) zeigt eine deutliche Abhängigkeit von den Versuchsbedingungen. Bei niedrigen Luftgeschwindigkeiten bis etwa $v_g \approx 10 \text{ m/s}$ ist eine Bimodalität der Dickenverteilung zu erkennen. Mit zunehmender Luftgeschwindigkeit bildet sich ein einzelner Peak heraus.

Bei langsameren Luftgeschwindigkeiten sind die Unterschiede zwischen Wellenberg und Wellental größer als bei schnelleren Geschwindigkeiten. Der Charakter der Oberflächenwellen bedingt einen sinusähnlichen zeitlichen Verlauf der Filmdicke am Messort. Die Dickenwerte nahe der Wellenberge und -täler, vergleichbar mit den Extrema einer Sinusschwingung, sind im Histogramm folglich viel häufiger vertreten als solche dazwischen. Des Weiteren erfasst der LTS keine gültigen Messwerte mehr, wenn der Winkel zwischen Sensormessachse und Oberflächennormale des Wasserfilmes einen kritischen Wert überschreitet. Diese Eigenschaft des Sensors verstärkt die Ausprägung einer bimodalen Häufigkeitsverteilung zusätzlich.

Ein repräsentativer 10 ms-Detailausschnitt aus einer Messreihe mit niedriger Luftgeschwindigkeit ist in Abbildung 4.7 dargestellt. Die Ursachen der bimodalen Verteilung der Filmdicke werden bei Betrachtung einer Einzelwelle deutlich. Nahe eines Wellenberges oder -tales ist die Steigung der Kurve vergleichsweise gering und der LTS nimmt gültige Messwerte auf. Im Bereich von etwa 4,0 ms bis 7,5 ms befinden sich mehrere steile Wellenrücken, sodass die Krümmung der Wasseroberfläche den kritischen Wert überschreitet und der Sensor keine gültigen Messwerte mehr erfasst. In diesem Fall wird der Messwert 0 ausgegeben, wodurch auch ein entsprechender Peak im Histogramm entsteht, vgl. Abbildung 4.6 (b).

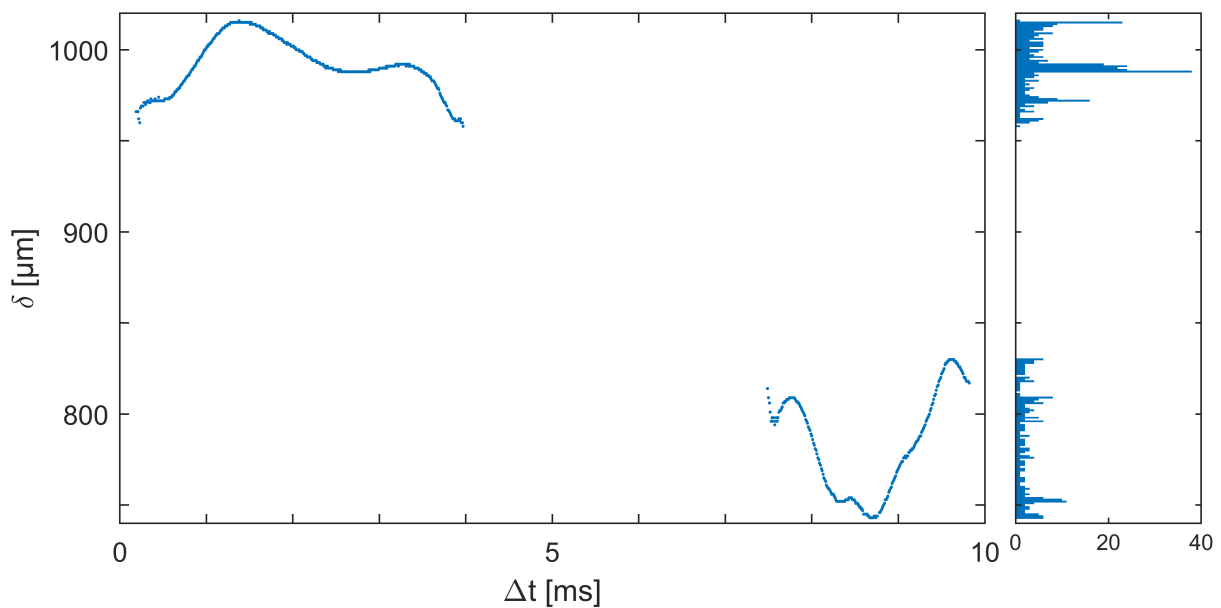


Abbildung 4.7: Messdatenausschnitt LTS, keine Erfassung gültiger Messdaten in Bereichen mit zu hoher erwarteter Oberflächenkrümmung des Wasserfilmes, $\Lambda_f = 120 \text{ mm}^2/\text{s}$, $v_g = 5 \text{ m/s}$

In Abbildung 4.8 ist ein 1,25 ms-Ausschnitt aus einer Messung mit hoher Luftgeschwindigkeit zu sehen. Der Neigungswinkel der Filmoberfläche überschreitet weniger häufig den kritischen Wert als bei niedrigeren Luftgeschwindigkeiten. Der Sensor kann innerhalb des dargestellten Zeitraumes nahezu durchgängig gültige Messdaten erfassen. Im nebenstehenden Histogramm ist die Bimodalität der Häufigkeitsverteilung weniger stark ausgeprägt.

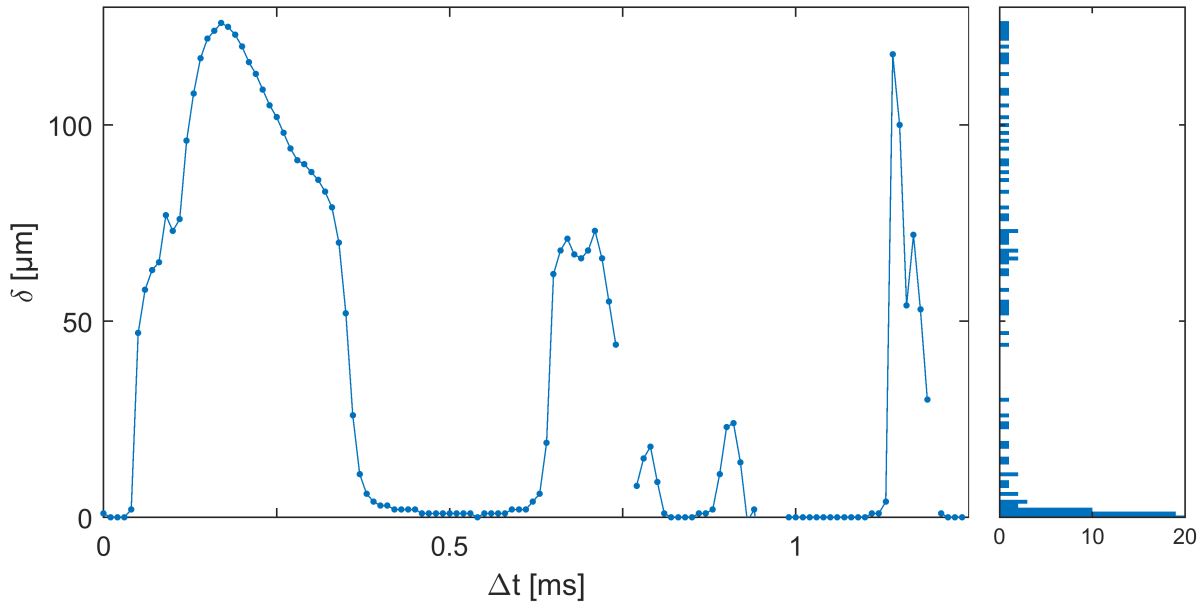


Abbildung 4.8: Messdatenausschnitt LTS, nur wenige Bereiche mit überkritischer Oberflächenneigung des Wasserfilmes, nahezu durchgängige Erfassung gültiger Messdaten möglich, $A_f = 120 \text{ mm}^2/\text{s}$, $v_g = 40 \text{ m/s}$

Ein direkter Vergleich der Kurvensteigungen zwischen Abbildung 4.7 und Abbildung 4.8 kann nicht angestellt werden. Für eine entsprechende Umwandlung der gemessenen zeitlichen in eine räumliche Darstellung der Filmoberfläche wird die Filmgeschwindigkeit benötigt, die im vorliegenden Fall unbekannt ist.

Bei konstanter Filmbeladung wird durch die Steigerung der Luftgeschwindigkeit über ein bestimmtes Niveau hinaus eine Filmströmung im überkritischen Bereich hervorgerufen, vgl. Abschnitt 2.3. Insbesondere das Abreißen von Tropfen aus dem Flüssigkeitsfilm kann Unstetigkeiten in der Filmoberfläche verursachen, die sich störend auf die Messungen auswirken. Bei Filmströmungen im unterkritischen Bereich kommt es typischerweise nicht zu dieser Art von Störungen. Der Charakter der Wandfilme, die sich in den relevanten Betriebsbereichen am HBK-S ausbilden, hat demzufolge einen entscheidenden Einfluss auf die erzielbare Qualität der Messergebnisse.

Zusammenfassend werden die Unterschiede zwischen den untersuchten Messverfahren CKS und LTS hinsichtlich Messfrequenz f_s und axialer Auflösung $\Delta\delta_{min}$ beispielhaft anhand von Abbildung 4.9 veranschaulicht. Das Diagramm zeigt typische Dickenmesswerte von beiden Sensoren mit qualitativ vergleichbaren Verläufen. Die Experimente mit den verschiedenen Sensoren wurden jeweils unter den gleichen Bedingungen durchgeführt. Die Messdaten wurden nicht zeitsynchron aufgenommen, wodurch den Messungen nicht derselbe tatsächlich existierende Film zugrunde liegt und ein quantitativer Vergleich ausgeschlossen ist.

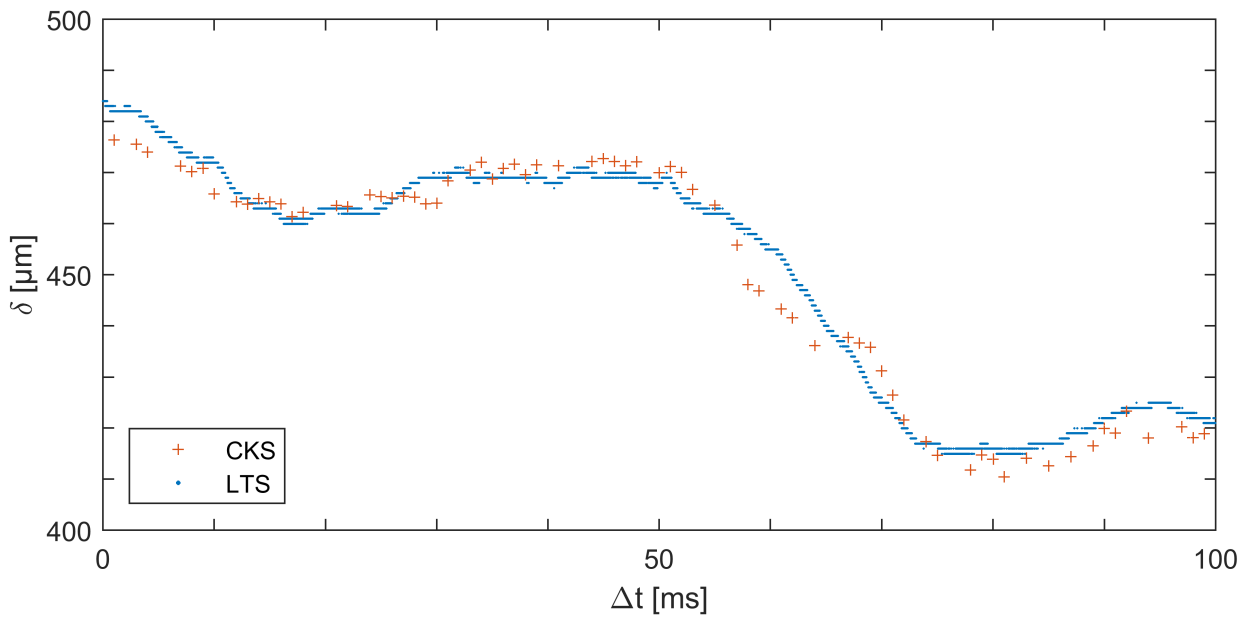


Abbildung 4.9: Qualitativer Vergleich der Messdaten von LTS und CKS, nicht-zeitsynchrone Messdatenerfassung, keine quantitative Vergleichbarkeit; $\Lambda_f = 60 \text{ mm}^2/\text{s}$, $v_g = 5 \text{ m/s}$

Mit dem CKS sind Filmdickenänderungen im Submikrometerbereich auflösbar, während der LTS Messwerte in $1 \text{ }\mu\text{m}$ -Schritten ausgibt, vgl. auch Tabelle 4.4. In Bezug auf die tatsächlich erreichbare Messfrequenz wird der CKS mit 1 kHz durch den LTS mit 100 kHz um zwei Zehnerpotenzen übertroffen.

Abschließend wird der untersuchte CKS als ungeeignet für die Dickenmessung an welligen Wandfilmen unter Laborbedingungen eingeschätzt, wie Abbildung 4.6 (a) veranschaulicht. Anhand der Häufigkeitsverteilung der gemessenen Filmdicken können keine Aussagen über die Filmdicke abgeleitet werden. Unter den Bedingungen am HBK-S ist diesbezüglich keine Verbesserung zu erwarten.

Der LTS wird aufgrund der durchgeführten Erprobungsversuche als prinzipiell geeignet eingeschätzt. Mithilfe der Häufigkeitsverteilung der Messwerte lassen sich beispielsweise mittlere Filmdicken bestimmen. Durch die kurze Messdauer bzw. hohe Messfrequenz kann teilweise der zeitliche Filmdickenverlauf einzelner Wellen rekonstruiert werden. Probleme zeigen sich in Form ungültiger Messwerte für Wellenflanken mit einer Neigung oberhalb eines kritischen Winkels. In Bezug auf die untersuchten Eigenschaften sowie den Parameterbereich, der durch die Experimente abgedeckt wird (vgl. Tabelle 4.2), kann insgesamt eine gute Qualität der Messdaten erreicht werden.

5 Fazit

5.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Masterarbeit wurden verschiedene Verfahren zur Bestimmung der Dicke von Flüssigkeitsfilmen untersucht. Als Entscheidungsgrundlage für die durchzuführenden Versuche wurden die prinzipiell möglichen Verfahren in einer Literaturstudie zusammengetragen. Diese beinhaltet neben mechanischen und elektrischen Methoden verschiedene akustische, auf Hochenergiestrahlung basierende sowie eine Reihe unterschiedlicher optischer Messverfahren.

Anhand der Leistungsfähigkeit bezüglich des definierten Anforderungsprofils der Messaufgabe erfolgte eine Beurteilung der jeweiligen Eignung. Die spezifischen Bedingungen in der Versuchsumgebung eines Hochdruckprüfstandes (HBK-S) wurden dabei ebenfalls berücksichtigt. Für zukünftige Projekte soll dort die Untersuchung von Filmdicken auf Teilen eines Brennersystems möglich sein. Vor der Integration in die genannte Zielumgebung wurden im Rahmen dieser Masterarbeit Erprobungsversuche mit zwei ausgewählten Messsystemen durchgeführt, einem chromatisch-konfokalen und einem Lasertriangulationssensor. Alle anderen untersuchten Verfahren kamen aus unterschiedlichen Gründen nicht infrage. Einige bringen eine potentielle Störung der Filmströmung mit sich oder bieten keinen ausreichend großen Messbereich. Andere sind für Messungen an welligen Filmen oder in verdampfenden Systemen ungeeignet. Speziell für Methoden, die auf laserinduzierter Fluoreszenz oder Lichtabsorption basieren, ergeben sich bei einer Verdampfung des Filmmediums Probleme aufgrund von Farbstoffablagerungen. In diesem Zusammenhang stellte die Anwendung einer akustischen Resonanzmethode unter Nutzung eines Ultraschall-Transducers eine besonders interessante Option dar, da sie berührungsfrei arbeitet und keinen optischen Zugang benötigt. Bisher ist diese Variante jedoch nicht bei Flüssigkeitsfilmen auf freien Oberflächen eingesetzt worden. Das Messsystem hätte mit einigem Aufwand für die vorliegende Messaufgabe weiterentwickelt werden müssen.

Für die Erprobungsversuche wurde ein vereinfachter Strömungsprüfstand mit generischem Wandfilmerzeuger im Labormaßstab in Betrieb genommen. Die erzeugten schubspannungsgetriebenen Wasserfilme wurden unter Laborbedingungen untersucht. Dabei konnten maximale

Luftgeschwindigkeiten von 40 m/s und Filmbeladungen bis 120 mm²/s bzw. Wassermassenströme von ca. 10 g/s erreicht werden. Die Dicke der vermessenen Wasserfilme lag etwa im Bereich von 0 bis 1200 µm.

Nach der Auswertung und Gegenüberstellung der aufgenommenen Messdaten wurde der chromatisch-konfokale Sensor in Bezug auf die vorliegende Messaufgabe als ungeeignet eingeschätzt. Anhand der Messwerte konnten keine zuverlässigen Aussagen über die Filmdicke abgeleitet werden. Unter den Bedingungen am Hochdruckprüfstand ist diesbezüglich keine Verbesserung zu erwarten.

Der Lasertriangulationssensor erfüllte innerhalb des abgedeckten Parameterbereiches die definierten Anforderungen und wurde daher als prinzipiell geeignet eingeschätzt. Die Bestimmung zeitlich gemittelter Filmdicken war möglich. Ebenso konnte durch die hohe Messfrequenz teilweise der zeitliche Dickenverlauf von einzelnen Oberflächenwellen des Flüssigkeitsfilmes aus den Messdaten rekonstruiert werden.

5.2 Ausblick

Als nächster Schritt ist die Integration des Lasertriangulationssensors am HBK-S vorgesehen. Infolgedessen kommt es zu starken Veränderungen wesentlicher Randbedingungen. Mit dem Strömungsprüfstand, der im Rahmen dieser Arbeit zum Einsatz kam, konnten lediglich Versuche unter Laborbedingungen durchgeführt werden. Die Frage nach der Übertragbarkeit der vorliegenden Ergebnisse auf die Versuchsumgebung am HBK-S und damit der Gültigkeitsbereich der Eignungsbeurteilung der untersuchten Sensoren ist in diesem Zusammenhang von zentraler Bedeutung.

Einige Änderungen beim Wechsel der Versuchsumgebung sind bereits bekannt, so etwa die Erhöhung der Umgebungstemperatur auf ca. 200 °C, die Steigerung des Druckes auf 20 bar sowie das Auftreten von Luftströmungsgeschwindigkeiten von bis zu 100 m/s. Aufgrund nicht vorhandener Herstellerangaben zur Druckbeständigkeit des Messgerätes muss diese voraussichtlich experimentell überprüft werden. Ferner sind geeignete Kühlmaßnahmen erforderlich, sodass der Sensor keine Temperaturen oberhalb der maximal zulässigen Betriebstemperatur von 50 °C erreicht. Der Wechsel der Filmflüssigkeit durch die Verwendung von extra leichtem Heizöl geht u. a. mit einer Änderung des Brechungsindex einher, der für die Berechnung der Filmdicke von entscheidender Bedeutung ist. Darüber hinaus beeinflusst die deutliche Steigerung der Strömungsgeschwindigkeit der Gasphase möglicherweise die zu vermessende Filmströmung im Hinblick auf die Oberflächenwellen und die mittlere Filmdicke bzw. allgemein die Art der Wandbenetzung. Auch die Auswirkungen der bisher nicht näher charakterisierten Prüfstandsvibrationen am HBK-S auf die Messsysteme sind kaum abschätzbar. Zum jetzigen Zeitpunkt werden Beschleunigungen von durchschnittlich ca. ± 5 g vermutet. Die Empfindlichkeit der Messtechnik gegenüber Vibrationen muss analog zur Druckbeständigkeit im Versuch ermittelt werden.

Literatur

- [1] SAMENFINK, W.: *Grundlegende Untersuchung zur Tropfeninteraktion mit schubspannungsgetriebenen Wandfilmen*, Institut für Thermische Strömungsmaschinen (ITS), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Diss., 1997. – Fak. f. Maschinenbau (MACH), Diss. v. 6.2.1997
- [2] ELSÄSSER, A.: *Kraftstoffaufbereitung in Verbrennungskraftmaschinen: Grundlagen der Strömung schubspannungsgetriebener Wandfilme*, Institut für Thermische Strömungsmaschinen (ITS), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Diss., 1998. – Fak. f. Maschinenbau (MACH), Diss. v. 27.5.1998
- [3] LAMMEL, O. ; SEVERIN, M. ; AX, H. ; LÜCKERATH, R. ; TOMASELLO, A. ; EMMI, Y. ; NOLL, B. ; AIGNER, M. ; PANEK, L.: High Momentum Jet Flames at elevated pressure, A: Experimental and numerical investigation for different fuels. In: *Proceedings of ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition GT2017*. Charlotte, NC, USA, Juni 2017, S. GT2017–64615
- [4] SCHÖBER, P.: *Berührungsfreie Erfassung beschleunigter schubspannungsgetriebener Kraftstoffwandfilme unter Druckeinfluss*, Institut für Thermische Strömungsmaschinen (ITS), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Diss., 2009. – Fak. f. Maschinenbau (MACH), Diss. v. 21.7.2009
- [5] MAYINGER, F.: *Strömung und Wärmeübergang in Gas-Flüssigkeits-Gemischen*. SpringerVerlag Wien, New York, 1982
- [6] GAMBARYAN-ROISMAN, T. ; STEPHAN, P.: Heat transfer analysis of falling film evaporation on structured surfaces. In: *Proceedings 12th International Heat Transfer Conference, Grenoble 3* (2002), S. 449–454
- [7] GLAHN, A.A. ; BUSAM, S.S. ; BLAIR, M.F. ; ALLARD, K.L. ; WITTIG, S.S.: Droplet Generation by Disintegration of Oil Films at the Rim of a Rotating Disk. In: *ASME Turbo Expo 2000: Power for Land, Sea, and Air, Volume 3: Heat Transfer; Electric Power; Industrial and Cogeneration 3* (2000), Nr. 2000-GT-0279, S. V003T01A083
- [8] BUSAM, S.: *Druckverlust und Wärmeübergang im Entlüftungssystem von Triebwerks-lagerkammern*, Institut für Thermische Strömungsmaschinen (ITS), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Diss., 2004. – Fak. f. Maschinenbau (MACH), Diss. v. 05.07.2004

- [9] MEIER, R.: *Experimentelle Untersuchung und numerische Simulation des luftgetriebenen Zerfalls von Flüssigkeitsfilmen*, Institut für Thermische Strömungsmaschinen (ITS), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Diss., 2010. – Fak. f. Maschinenbau (MACH), Diss. v. 22.11.2010
- [10] ZHAO, Y.Y.: Analysis of flow development in centrifugal atomization: Part I. Film thickness of a fully spreading melt. In: *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering* 12 (2004), Nr. 5, S. 959
- [11] GLAHN, A. ; WITTIG, S.: Two-Phase Air/Oil Flow in Aero Engine Bearing Chambers - Characterization of Oil Film Flows. In: *Proceedings ASME* (1995), Nr. 95-GT-114
- [12] HALLMANN, M.: *Numerische Beschreibung der Gemischbildung in Verbrennungsmaschinen*, Institut für Thermische Strömungsmaschinen (ITS), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Diss., 1994. – Fak. f. Maschinenbau (MACH), Diss. v. 14.2.1994
- [13] LANGER, O.: *Experimentelle und theoretische Bestimmung der Kraftstoffspeicherung im Saugrohr eines Ottomotors*, Universität Darmstadt, Diss., 1996
- [14] ROTTENKOLBER, G.: *Ottomotoren im Kaltstart: Laseroptische Messverfahren zur Charakterisierung des Kraftstofftransports*, Institut für Thermische Strömungsmaschinen, Universität Karlsruhe (TH), Diss., 2001. – Fak. f. Maschinenbau (MACH), Diss. v. 21.06.2001
- [15] TRIBULOWSKI, J.: *Untersuchungen zur Gemischbildung und Verbrennung an einem Ottomotor mit Saugrohreinspritzung im Kaltstart und Warmlauf*, Institut für Kolbenmaschinen (IFKM), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Diss., 2004. – Fak. f. Maschinenbau (MACH), Diss. v. 18.7.2003
- [16] BIRKHOFF, F.: *Selektive katalytische Reduktion von Stickoxiden in Kraftfahrzeugen: Untersuchung der Einspritzung von Harnstoffwasserlösung*, Institut für Technische Chemie und Polymerchemie (ITCP), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Diss., 2007. – Fak. f. Maschinenbau (MACH), Diss. v. 12.7.2007
- [17] WORTHINGTON, A.M.: On the forms assumed by drops of liquids falling vertically on a horizontal plate. In: *Proceedings of the Royal Society of London* Bd. 25, 1876, S. 261–272
- [18] WORTHINGTON, A.M.: A second paper on the forms assumed by of liquids falling vertically on a horizontal plate. In: *Proceedings of the Royal Society of London* Bd. 25, 1877, S. 498–503
- [19] REIN, M.: Phenomena of liquid drop impact on solid and liquid surfaces. In: *Fluid Dynamics Research* 12 (1993), Nr. 2, S. 61–93. – ISSN 0169–5983
- [20] YARIN, A.L.: Drop Impact Dynamics: Splashing, Spreading, Receding, Bouncing. In: *Annual Review of Fluid Mechanics* 38 (2006), Nr. 1, S. 159–192

- [21] LIANG, G. ; MUDAWAR, I.: Review of mass and momentum interactions during drop impact on a liquid film. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 101 (2016), S. 577 – 599. – ISSN 0017–9310
- [22] LIANG, G. ; MUDAWAR, I.: Review of drop impact on heated walls. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 106 (2017), S. 103–126. – ISSN 0017–9310
- [23] MACKLIN, W.C. ; METAXAS, G.J.: Splashing of drops on liquid layers. In: *Journal of Applied Physics* 47 (1976), Nr. 9, S. 3963–3970
- [24] TROPEA, C. ; MARENGO, M.: The Impact of Drops on Walls and Films. In: *Multiphase Science and Technology* 11 (1999), Nr. 1, S. 19–36. – ISSN 0276–1459
- [25] JOSSERAND, C. ; THORODDSEN, S.T.: Drop Impact on a Solid Surface. In: *Annual Review of Fluid Mechanics* 48 (2016), Nr. 1, S. 365–391
- [26] LEIDENFROST, J.G.: *De aquae communis nonnullis qualitatibus tractatus*. Duisburg ad Rhenum : Ovenius, 1756
- [27] ANDERS, K. ; ROTH, N. ; FROHN, A.: The velocity change of ethanol droplets during collision with a wall analysed by image processing. In: *Experiments in Fluids* 15 (1993), Juli, Nr. 2, S. 91–96. – ISSN 1432–1114
- [28] BURTON, J.C. ; SHARPE, A.L. ; VAN DER VEEN, R.C.A. ; FRANCO, A. ; NAGEL, S.R.: Geometry of the Vapor Layer Under a Leidenfrost Drop. In: *Phys. Rev. Lett.* 109 (2012), August, S. 074301
- [29] JAYARATNE, O.W. ; MASON, B.J.: The coalescence and bouncing of water drops at an air-water interface. In: *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 280 (1964), Nr. 1383, S. 545–565. – ISSN 0080–4630
- [30] REYNOLDS, O.: On the floating of drops on the surface of water depending only on the purity of the surface. In: *Proc. Manchester Lit. Phil. Soc.* Bd. 21, 1881. – auch in: O. Reynolds, Paper Mech. Phys. Subj. 1, 413–414, Cambridge, 1900
- [31] ENGELS, P.: *Untersuchungen des Abscheideverhaltens von Tropfenfanggittern in senkrecht aufsteigendem Luftstrom*, RWTH Aachen, Dissertation, 1971
- [32] STOW, C.D. ; HADFIELD, M.G.: An experimental investigation of fluid flow resulting from the impact of a water drop with an unyielding dry surface. In: *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 373 (1981), Nr. 1755, S. 419–441. – ISSN 0080–4630
- [33] WEISS, D.A.: *Periodischer Aufprall monodisperser Tropfen gleicher Geschwindigkeit auf feste Oberflächen*, Max-Planck-Institut für Strömungsforschung, Universität Göttingen, Diss., 1993
- [34] ENGEL, O.G.: Initial Pressure, Initial Flow Velocity, and the Time Dependence of Crater Depth in Fluid Impacts. In: *Journal of Applied Physics* 38 (1967), Nr. 10, S. 3935–3940

- [35] SCHMIDT, P. ; KNAUSS, G.: Prallzerstäubung von Flüssigkeiten bei Nichtbenetzung. In: *Chemie Ingenieur Technik* 48 (1976), Nr. 7, S. 659–659
- [36] WALZEL, P.: Zerteilgrenze beim Tropfenprall. In: *Chemie Ingenieur Technik* 52 (1980), Nr. 4, S. 338–339
- [37] PEARSON, J. ; MAYNES, D. ; WEBB, B. ; THOMSON, S.L.: Quantitative and Qualitative Results from Droplet Impingement Experiments on Superhydrophobic Surfaces with Micro-ribs for Three Liquid Types. In: *Brigham Young University, Provo Main Campus, Utah, United States* (2018), November
- [38] SUÁREZ, J.M. *Artful photography of a water droplet after impacting on a water surface*. Flickr Online Image Hosting Photo Community. Juli 2008
- [39] RESKE, R.: Experimentelle Untersuchung des Verhaltens frei fallender Wassertropfen beim Auftreffen auf dünnen Wasserfilmen. In: *Fortschr.-Ber. VDI-Z.* 7 (1987), Nr. 115, S. 1–109. – ISSN 0178–9538
- [40] MUNDO, C.: *Zur Sekundärzerstäubung newtonscher Fluide an Oberflächen*, Universität Erlangen-Nürnberg, Diss., 1996
- [41] BURZYNSKI, D.A. ; BANSMER, S.E.: Droplet splashing on thin moving films at high Weber numbers. In: *International Journal of Multiphase Flow* 101 (2018), S. 202 – 211. – ISSN 0301–9322
- [42] MOREIRA, A.L.N. ; MOITA, A.S. ; PANÃO, M.R.: Advances and challenges in explaining fuel spray impingement: How much of single droplet impact research is useful? In: *Progress in Energy and Combustion Science* 36 (2010), Nr. 5, S. 554–580. – ISSN 0360–1285
- [43] KHAVARI, M. ; SUN, C. ; LOHSE, D. ; TRAN, T.: Fingering patterns during droplet impact on heated surfaces. In: *Soft Matter* 11 (2015), Nr. 17, S. 3298–3303
- [44] SIVAKUMAR, D. ; TROPEA, C.: Splashing impact of a spray onto a liquid film. In: *Physics of Fluids* 14 (2002), Nr. 12, S. L85–L88
- [45] SCHOBER, P. ; EBNER, J. ; SCHÄFER, O. ; WITTIG, S.: Experimental Study on the Effect of a Strong Negative Pressure Gradient on a Shear-Driven Liquid Fuel Film. In: *9th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems (ICLASS)*, Sorrent, Italy, 2003
- [46] WURZ, D.: *Experimentelle Untersuchung des Strömungsverhaltens dünner Wasserfilme und deren Rückwirkung auf einen gleichgerichteten Luftstrom mäßiger bis hoher Unterschallgeschwindigkeit*, Universität Karlsruhe, Fakultät für Maschinenbau, Diss., Januar 1971
- [47] JURMAN, L.A. ; MCCREADY, M.J.: Study of waves on thin liquid films sheared by turbulent gas flows. In: *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics* 1 (1989), Nr. 3, S. 522–536

- [48] BRUNO, K. ; MCCREADY, M.J.: Origin of roll waves in horizontal gas-liquid flows. In: *AIChE Journal* 34 (1988), Nr. 9, S. 1431–1440
- [49] WOODMANSEE, D.E. ; HANRATTY, T.J.: Mechanism for the removal of droplets from a liquid surface by a parallel air flow. In: *Chemical Engineering Science* 24 (1969), Nr. 2, S. 299–307. – ISSN 0009–2509
- [50] KIM, S.: *Experimentelle Untersuchung zur Gas-Flüssigkeits-Grenzflächenströmung mit mäßig positivem Druckgradient*, Institut für Thermische Strömungsmaschinen (ITS), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Diss., 1976
- [51] HIMMELSBACH, J.: *Zweiphasenströmungen mit schubspannungsgetriebenen welligen Flüssigkeitsfilmen in turbulenter Heißluftströmung – Meßtechnische Erfassung und numerische Beschreibung*, Institut für Thermische Strömungsmaschinen (ITS), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Diss., 1992
- [52] ISHII, M. ; GROLMES, M.A.: Inception criteria for droplet entrainment in two-phase concurrent film flow. In: *AIChE Journal* 21 (1975), März, Nr. 2, S. 308–318
- [53] VAN ROSSUM, J.J.: Experimental investigation of horizontal liquid films: Wave formation, atomization, film thickness. In: *Chemical Engineering Science* 11 (1959), Nr. 1, S. 35–52. – ISSN 0009–2509
- [54] SATTELMAYER, T. ; SILL, K.H. ; WITTIG, S.: Nonintrusive optical measurement technique for wavy liquid films: Determination of film thickness and wave structure. In: *Technisches Messen* 54 (1987), April, Nr. 4, S. 155–160
- [55] HEWITT, G.F. ; JAYANTI, S. ; HOPE, C.B.: Structure of thin liquid films in gas-liquid horizontal flow. In: *International Journal of Multiphase Flow* 16 (1990), Nr. 6, S. 951–957. – ISSN 0301–9322
- [56] SHEDD, T.A. ; NEWELL, T.A.: Automated optical liquid film thickness measurement method. In: *Review of Scientific Instruments* 69 (1998), Nr. 12, S. 4205–4213
- [57] TIBIRIÇÁ, C.B. ; DO NASCIMENTO, F.J. ; RIBATSKI, G.: Film thickness measurement techniques applied to micro-scale two-phase flow systems. In: *Experimental Thermal and Fluid Science* 34 (2010), Nr. 4, S. 463 – 473. – ECI International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale. – ISSN 0894–1777
- [58] HENKEL, S. ; BEYRAU, F. ; HARDALUPAS, Y. ; TAYLOR, A.M.K.P.: Novel method for the measurement of liquid film thickness during fuel spray impingement on surfaces. In: *Optics Express* 24 (2016), Februar, Nr. 3, S. 2542–2561
- [59] HANRATTY, T.J. ; ENGEN, J.M.: Interaction between a turbulent air stream and a moving water surface. In: *AIChE Journal* 3 (1957), Nr. 3, S. 299–304
- [60] SEKOGUCHI, K. ; FUKUI, H. ; MATSUOKA, T. ; NISHIKAWA, K.: Investigation into the Statistical Characteristics of Bubbles in Two-Phase Flow: 1st Report. Fundamentals of the Instrumentation Using the Electric Resistivity Probe Technique. In: *Bulletin of JSME* 18 (1975), Nr. 118, S. 391–396

- [61] DALLMAN, J.C.: *Investigation of separated flow model in annular gas-liquid two-phase flows*, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL, Diss., 1978
- [62] RIZK, N.K. ; LEFEBVRE, A.H.: The Influence of Liquid Film Thickness on Airblast Atomization. In: *J. Eng. Power* 102 (1980), Nr. 3, S. 706–710
- [63] SEKOGUCHI, K. ; OUSAKA, A. ; FUKANO, T. ; MORIMOTO, T.: Air-water Annular Two-phase Flow in a Horizontal Tube: 1st Report, Circumferential Distribution of Film Thicknesses. In: *Bulletin of JSME* 25 (1982), Nr. 208, S. 1559–1566
- [64] LAURINAT, J.E.: *Studies on the Effects of Pipe Size on Horizontal Annular Two-Phase Flows*, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL, Diss., 1982
- [65] HEWITT, G.F. ; HETSRONI, G. (Hrsg.): *Measurement of liquid-film thickness*. New York : McGraw-Hill, 1982. – 67–85 S
- [66] CONEY, J.E.R. ; EL-SHAFEI, E.A.M. ; SHEPPARD, C.G.W.: A dual laser beam method for wavy film thickness measurement. In: *Optics and Lasers in Engineering* 11 (1989), Nr. 1, S. 1–14. – ISSN 0143–8166
- [67] FUKANO, T. ; OUSAKA, A.: Prediction of the circumferential distribution of film thickness in horizontal and near-horizontal gas-liquid annular flows. In: *International Journal of Multiphase Flow* 15 (1989), 05, S. 403–419
- [68] MIYA, M.: *Properties of Roll Waves*, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL, Diss., 1970
- [69] CONEY, M.W.E.: The theory and application of conductance probes for the measurement of liquid film thickness in two-phase flow. In: *Journal of Physics E: Scientific Instruments* 6 (1973), Nr. 9, S. 903
- [70] ÖZGÜ, M.R. ; CHEN, J.C. ; EBERHARDT, N.: A capacitance method for measurement of film thickness in two-phase flow. In: *Review of Scientific Instruments* 44 (1973), Nr. 12, S. 1714–1716
- [71] BROWN, R.C. ; PAOLO, A. ; SEVERINO, Z.: The use of wire probes for the measurement of liquid film thickness in annular gas-liquid flows. In: *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 56 (1978), Nr. 6, S. 754–757
- [72] VILLENEUVE, J.P. ; OUELLET, Y.: Laboratory systems for measuring short-term changes in water levels. In: *Review of Scientific Instruments* 49 (1978), Nr. 10, S. 1425–1431
- [73] LAURINAT, J.E.: *Pressure drop and film height measurements for annular two-phase flow in a horizontal two-inch pipe*, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL, Diplomarbeit, 1979
- [74] SUZUKI, K. ; HAGIWARA, Y. ; SATO, T.: Heat transfer and flow characteristics of two-phase two-component annular flow. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 26 (1983), Nr. 4, S. 597–605. – ISSN 0017–9310

- [75] ANDRITSOS, N.: *Effect of Pipe Diameter and Liquid Viscosity on Horizontal Stratified Flow*, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL, Diss., 1985
- [76] AZZOPARDI, B.J.: Disturbance wave frequencies, velocities and spacing in vertical annular two-phase flow. In: *Nuclear Engineering and Design* 92 (1986), Nr. 2, S. 121–133. – ISSN 0029–5493
- [77] KARAPANTSIOS, T.D. ; PARAS, S.V. ; KARABELAS, A.J.: Statistical characteristics of free falling films at high reynolds numbers. In: *International Journal of Multiphase Flow* 15 (1989), Nr. 1, S. 1–21. – ISSN 0301–9322
- [78] HAGIWARA, Y. ; ESMAEILZADEH, E. ; TSUTSUI, H. ; SUZUKI, K.: Simultaneous measurement of liquid film thickness, wall shear stress and gas flow turbulence of horizontal wavy two-phase flow. In: *International Journal of Multiphase Flow* 15 (1989), Nr. 3, S. 421–431. – ISSN 0301–9322
- [79] JAYANTI, S. ; HEWITT, G.F. ; WHITE, S.P.: Time-dependent behaviour of the liquid film in horizontal annular flow. In: *International Journal of Multiphase Flow* 16 (1990), Nr. 6, S. 1097–1116. – ISSN 0301–9322
- [80] KLAUSNER, J.F. ; ZENG, L.Z. ; BERNHARD, D.M.: Development of a film thickness probe using capacitance for asymmetrical two-phase flow with heat addition. In: *Review of Scientific Instruments* 63 (1992), Nr. 5, S. 3147–3152
- [81] BOUSMAN, W.S. ; MCQUILLEN, J.B. ; WITTE, L.C.: Gas-liquid flow patterns in micro-gravity: Effects of tube diameter, liquid viscosity and surface tension. In: *International Journal of Multiphase Flow* 22 (1996), Nr. 6, S. 1035–1053. – ISSN 0301–9322
- [82] SELEGHIM JR, P. ; HERVIEU, E.: Direct imaging of two-phase flows by electrical impedance measurements. In: *Measurement Science and Technology* 9 (1998), Nr. 9, S. 1492
- [83] FUKANO, T.: Measurement of time varying thickness of liquid film flowing with high speed gas flow by a constant electric current method (CECM). In: *Nuclear Engineering and Design* 184 (1998), Nr. 2, S. 363 – 377. – ISSN 0029–5493
- [84] LI, W. ; ZHOU, F. ; LI, R. ; ZHOU, L.: Experimental study on the characteristics of liquid layer and disturbance waves in horizontal annular flow. In: *Journal of Thermal Science* 8 (1999), Dec, Nr. 4, S. 235–242. – ISSN 1993–033X
- [85] BURNS, J.R. ; RAMSHAW, C. ; JACHUCK, R.J.: Measurement of liquid film thickness and the determination of spin-up radius on a rotating disc using an electrical resistance technique. In: *Chemical Engineering Science* 58 (2003), Nr. 11, S. 2245–2253. – ISSN 0009–2509
- [86] JU, P. ; BROOKS, C.S. ; ISHII, M. ; LIU, Y. ; HIBIKI, T.: Film thickness of vertical upward co-current adiabatic flow in pipes. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 89 (2015), S. 985 – 995. – ISSN 0017–9310

- [87] ALOUI, F. ; GAIED, L. ; ABASSI, W. ; LIPPERT, M. ; BIGERELLE, M.: Measurement of thin liquid film thickness between two mechanical surfaces in relative movement using the conductimetry technique: Application for hydrodynamic lubrication. In: *23ème Congrès Français de Mécanique CFM 2017, Lille, France (FR)*, AFM, Association Française de Mécanique, 08 2017
- [88] ALIMOV, R.Z. ; KAZARINOV, V.G. ; NEVEROV, A.M.: Thickness measurements of thin liquid layers by means of an instrument with a capacitive transducer. In: *Measurement Techniques* 7 (1964), Sep, Nr. 9, S. 776–779. – ISSN 1573–8906
- [89] LESKOVAR, B. ; SUN, R.K. ; KOLBE, W.F. ; TURKO, B.: Measurement of the Thickness of Liquid Film by Means of Capacitance Method / Electric Power Research Institute. 1979. – Special Report. Research Project RP-1379, NP-1212
- [90] SUNDARAM, R.K. ; CHEN, J.C. ; LONDON, E.J. ; EBERHARDT, N.: Measurement of thin film thicknesses in two-phase flow. In: *Proceedings of the 27th International Instrumentation Symposium, ISA Aerospace Industry Division and ISA Test Measurement Division* (1981)
- [91] TURKO, B.T. ; KOLBE, W.F. ; LESKOVAR, B. ; SUN, R.K.: Development of electro-optical instrumentation for reactor safety studies. In: *IEEE Transactions on Nuclear Science* NS-28 (1981), Nr. 1, S. 728–739
- [92] SUN, R.K. ; KOLBE, W.F. ; LESKOVAR, B. ; TURKO, B.T.: Measurement of thickness of thin water film in two-phase flow by capacitance method. In: *IEEE Transactions on Nuclear Science* NS-29 (1982), Nr. 1, S. 688–694
- [93] CHUN, M. ; SUNG, C.: Parametric effects on the void fraction measurement by capacitance transducers. In: *International Journal of Multiphase Flow* 12 (1986), Nr. 4, S. 627–640. – ISSN 0301–9322
- [94] KLUG, F. ; MAYINGER, F.: Impedance based flow reconstruction - A novel flow composition measuring technique for multi-phase-flows. In: *Nuclear Engineering and Design* 146 (1994), Nr. 1, S. 35–42. – ISSN 0029–5493
- [95] CHEN, X. ; BUTLER, T. ; BRILL, J.P.: Capacitance probes for measurement of liquid film thickness. In: *Proceedings of the ASME Heat Transfer Division at the International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Vol. 3, ASME, Atlanta, GA* HTD-334 (1996), S. 201–208
- [96] THORNCROFT, G.E. ; KLAUSNER, J.F.: A Capacitance Sensor for Two-Phase Liquid Film Thickness Measurements in a Square Duct. In: *Journal of Fluids Engineering* 119 (1997), März, Nr. 1, S. 164–169. – ISSN 0098–2202
- [97] CUI, Z. ; YANG, C. ; SUN, B. ; WANG, H.: Liquid Film Thickness Estimation using Electrical Capacitance Tomography. In: *Measurement Science Review* 14 (2014), Februar, S. 8–15

- [98] LEE, K.B. ; KIM, J.R. ; PARK, G.C. ; CHO, H.K.: Feasibility Test of a Liquid Film Thickness Sensor on a Flexible Printed Circuit Board Using a Three-Electrode Conductance Method. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 17 (2017), Nr. 1, S. 42
- [99] YU, Y. ; MA, L. ; YE, H. ; ZHENG, Y. ; MA, Y.: Design of instantaneous liquid film thickness measurement system for conductive or non-conductive fluid with high viscosity. In: *AIP Advances* 7 (2017), Nr. 6, S. 065207
- [100] PAPADAKIS, E.P. ; FOWLER, K.A.: Broad-Band Transducers: Radiation Field and Selected Applications. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 50 (1971), Nr. 3A, S. 729–745
- [101] TATTERSALL, H.G.: The ultrasonic pulse-echo technique as applied to adhesion testing. In: *Journal of Physics D: Applied Physics* 6 (1973), Nr. 7, S. 819
- [102] KRAUTKRÄMER, J. ; KRAUTKRÄMER, H. ; GRABENDÖRFER, W. (Hrsg.) ; GREGOR, M. (Hrsg.) ; NIKLAS, L. (Hrsg.) ; FRIELINGHAUS, R. (Hrsg.) ; KAULE, W. (Hrsg.) ; SCHLEMM, H. (Hrsg.) ; SCHLENGERMANN, U. (Hrsg.) ; STEIGER, H. (Hrsg.): *Ultrasonic Testing of Materials*. 4th Fully Revised Edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 1990. – Translation of the 5th Revised German Edition
- [103] SIMONDS, R.M.: Propagation of broadband ultrasound in attenuating media. In: *Ultrasonic Imaging* 5 (1983), Nr. 2, S. 148 – 160. – ISSN 0161–7346
- [104] LYNNWORTH, L.C.: *Ultrasonic Measurements for Process Control: Theory, Techniques, Applications*. 1st. San Diego : Academic Press, 1989. – ISBN 978–0–12–460585–5
- [105] TSUKAHARA, Y. ; NAKASO, N. ; KUSHIBIKI, J. ; CHUBACHI, N.: An acoustic micrometer and its application to layer thickness measurements. In: *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* 36 (1989), May, Nr. 3, S. 326–331. – ISSN 0885–3010
- [106] PIALUCHA, T. ; GUYOTT, C.C.H. ; CAWLEY, P.: Amplitude spectrum method for the measurement of phase velocity. In: *Ultrasonics* 27 (1989), Nr. 5, S. 270–279. – ISSN 0041–624X
- [107] HOSTEN, B.: Bulk heterogeneous plane waves propagation through viscoelastic plates and stratified media with large values of frequency domain. In: *Ultrasonics* 29 (1991), Nr. 6, S. 445–450. – ISSN 0041–624X
- [108] LU, Q. ; SURYANARAYANA, N.V. ; CHRISTODOULU, C.: Film thickness measurement with an ultrasonic transducer. In: *Experimental Thermal and Fluid Science* 7 (1993), Nr. 4, S. 354 – 361. – ISSN 0894–1777
- [109] PIALUCHA, Tom ; CAWLEY, Peter: The detection of thin embedded layers using normal incidence ultrasound. In: *Ultrasonics* 32 (1994), Nr. 6, S. 431 – 440. – ISSN 0041–624X
- [110] KINRA, V.K. ; JAMINET, P.T. ; ZHU, C. ; IYER, V.R.: Simultaneous measurement of the acoustical properties of a thin-layered medium: The inverse problem. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 95 (1994), Nr. 6, S. 3059–3074

- [111] PEI, J. ; DEGERTEKIN, F.L. ; HONEIN, B.V. ; KHURI-YAKUB, B.T. ; SARASWAT, K.C.: In situ thin film thickness measurement using ultrasonics waves. In: *1994 Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium* Bd. 2, 1994, S. 1237–1240
- [112] PEI, J. ; DEGERTEKIN, F.L. ; KHURI-YAKUB, B.T. ; SARASWAT, K.C.: In situ thin film thickness measurement with acoustic Lamb waves. In: *Applied Physics Letters* 66 (1995), Nr. 17, S. 2177–2179
- [113] DRINKWATER, B. W. ; DWYER-JOYCE, R. S. ; CAWLEY, P.: A Study of the Interaction between Ultrasound and a Partially Contacting Solid–Solid Interface. In: *Proceedings: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 452 (1996), 12, Nr. 1955, S. 2613–2628. – ISSN 13645021
- [114] PEDERSEN, P.C. ; CAKARESKI, Z. ; HERMANSON, J.C.: Ultrasonic monitoring of film condensation for applications in reduced gravity. In: *Ultrasonics* 38 (2000), Nr. 1, S. 486 – 490. – ISSN 0041–624X
- [115] SHEAR, M.A.: *Ultrasonic Measurement of Thin Condensing Fluid Films*, Worcester Polytechnic Institute, Electrical & Computer Engineering, Diplomarbeit, 04 2002
- [116] DWYER-JOYCE, R.S. ; DRINKWATER, B.W. ; DONOHOE, C.J.: The measurement of lubricant-film thickness using ultrasound. In: *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 459 (2003), Nr. 2032, S. 957–976. – ISSN 1364–5021
- [117] HARPER, P. ; HOLLINGSWORTH, B. ; DWYER-JOYCE, R. ; DRINKWATER, B.: Journal bearing oil film measurement using ultrasonic reflection. In: *Tribology and Interface Engineering Series* 41 (2003), 12, Nr. 41, S. 469–476
- [118] DWYER-JOYCE, R.S. ; HARPER, P. ; DRINKWATER, B.W.: A Method for the Measurement of Hydrodynamic Oil Films Using Ultrasonic Reflection. In: *Tribology Letters* 17 (2004), Aug, Nr. 2, S. 337–348. – ISSN 1573–2711
- [119] DWYER-JOYCE, R.S. ; REDDYHOFF, T. ; DRINKWATER, B.: Operating limits for acoustic measurement of rolling bearing oil film thickness. In: *Tribology Transactions* 47 (2004), August, Nr. 3, S. 366–375. – Copyright (c) 2004 Taylor & Francis. This is an author produced version of a paper published in 'Tribology Transactions'. Uploaded in accordance with the publisher's self-archiving policy.
- [120] TULSIANI, D. ; PEDERSEN, P.: Measurement of condensation in reduced gravity using fringe projection. In: *Proceedings of the 2004 SEM X International Congress and Exposition on Experimental and Applied Mechanics*, 2004
- [121] CHEN, Z.Q. ; HERMANSON, J.C. ; SHEAR, M.A. ; PEDERSEN, P.C.: Ultrasonic monitoring of interfacial motion of condensing and non-condensing liquid films. In: *Flow Measurement and Instrumentation* 16 (2005), Nr. 6, S. 353 – 364. – ISSN 0955–5986
- [122] REDDYHOFF, T. ; DWYER-JOYCE, R. ; HARPER, P.: Ultrasonic measurement of film thickness in mechanical seals. In: *Sealing Technology* 2006 (2006), 07, Nr. 7, S. 7–11

- [123] REDDYHOFF, T. ; DWYER-JOYCE, R.S. ; HARPER, P.: A New Approach for the Measurement of Film Thickness in Liquid Face Seals. In: *Tribology Transactions* 51 (2008), Nr. 2, S. 140–149
- [124] CARVALHO, R.D.M. ; VENTURINI, O.J. ; NEVES JR., F. ; FRANÇA, F.A.: Axial bubbly flow topology: A comparative study using the ultrasonic technique and high-speed filming. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Transport Phenomena in Multiphase Systems, HEAT 2008*. Bialystok, Poland : Bialystok Technical University, Juli 2008
- [125] DWYER-JOYCE, R.S. ; REDDYHOFF, T. ; ZHU, J.: Ultrasonic Measurement for Film Thickness and Solid Contact in Elastohydrodynamic Lubrication. In: *J. Tribol* 133 (2011), 06, Nr. 3, S. 031501
- [126] HUNTER, A. ; DWYER-JOYCE, R. ; HARPER, P.: Calibration and validation of ultrasonic reflection methods for thin-film measurement in tribology. In: *Measurement Science and Technology* 23 (2012), Nr. 10, S. 105605
- [127] JIAO, J. ; LIU, W. ; ZHANG, J. ; ZHANG, Q. ; HE, C. ; WU, B.: Time-frequency analysis for ultrasonic measurement of liquid-layer thickness. In: *Mechanical Systems and Signal Processing* 35 (2013), Nr. 1, S. 69 – 83. – ISSN 0888–3270
- [128] PRAHER, B. ; STEINBICHLER, G.: Ultrasound-based measurement of liquid-layer thickness: A novel time-domain approach. In: *Mechanical Systems and Signal Processing* 82 (2017), S. 166 – 177. – ISSN 0888–3270
- [129] ZHANG, K. ; WU, T. ; MENG, Q. ; MENG, Q.: Ultrasonic measurement of oil film thickness using piezoelectric element. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 94 (2018), Feb, Nr. 9, S. 3209–3215. – ISSN 1433–3015
- [130] HAJIREZA, P. ; KRAUSE, K. ; BRETT, M. ; ZEMP, R.: Glancing angle deposited nanostructured film Fabry-Perot etalons for optical detection of ultrasound. In: *Opt. Express* 21 (2013), März, Nr. 5, S. 6391–6400
- [131] LI, H. ; DONG, B. ; ZHANG, Z. ; ZHANG, H.F. ; SUN, C.: A transparent broadband ultrasonic detector based on an optical micro-ring resonator for photoacoustic microscopy. In: *Scientific Reports* 4 (2014), März, S. 4496
- [132] HAJIREZA, P. ; KRAUSE, K. ; BRETT, M. ; ZEMP, R.: In vivo optical resolution photoacoustic microscopy using glancing angle-deposited nanostructured Fabry-Perot etalons. In: *Opt. Lett.* 40 (2015), April, Nr. 7, S. 1350–1353
- [133] BERER, T. ; LEISS-HOLZINGER, E. ; HOCHREINER, A. ; BAUER-MARSCHALLINGER, J. ; BUCHSBAUM, A.: Multimodal noncontact photoacoustic and optical coherence tomography imaging using wavelength-division multiplexing. In: *Journal of Biomedical Optics* 20 (2015), April, Nr. 4, S. 46013

- [134] CHEN, Z. ; YANG, S. ; WANG, Y. ; XING, D.: All-optically integrated photo-acoustic microscopy and optical coherence tomography based on a single Michelson detector. In: *Opt. Lett.* 40 (2015), Juni, Nr. 12, S. 2838–2841
- [135] CHEN, Z. ; YANG, S. ; XING, D.: Optically integrated trimodality imaging system: combined all-optical photoacoustic microscopy, optical coherence tomography, and fluorescence imaging. In: *Opt. Lett.* 41 (2016), April, Nr. 7, S. 1636–1639
- [136] SATHIYAMOORTHY, K. ; STROHM, E.M. ; KOLIOS, M.C.: Low-power noncontact photoacoustic microscope for bioimaging applications. In: *Journal of Biomedical Optics* 22 (2017), April, Nr. 4, S. 046001
- [137] ZHU, X. ; HUANG, Z. ; WANG, G. ; LI, W. ; ZOU, D. ; LI, C.: Ultrasonic detection based on polarization-dependent optical reflection. In: *Opt. Lett.* 42 (2017), Februar, Nr. 3, S. 439–441
- [138] HAINDL, R. ; PREISSER, S. ; ANDREANA, M. ; ROHRINGER, W. ; STURTZEL, C. ; DISTEL, M. ; CHEN, Z. ; RANK, E. ; FISCHER, B. ; DREXLER, W. ; LIU, M.: Dual modality reflection mode optical coherence and photoacoustic microscopy using an akinetic sensor. In: *Opt. Lett.* 42 (2017), Nov, Nr. 21, S. 4319–4322
- [139] ROY, R.P. ; KU, J. ; I. ; SHUKLA, J.: Microwave method for measurement of liquid film thickness in gas-liquid flow. In: *Review of Scientific Instruments* 57 (1986), Nr. 5, S. 952–956
- [140] ZHAO, Y. ; BI, Q. ; HU, R.: Recognition and measurement in the flow pattern and void fraction of gas-liquid two-phase flow in vertical upward pipes using the gamma densitometer. In: *Applied Thermal Engineering* 60 (2013), Nr. 1, S. 398 – 410. – ISSN 1359–4311
- [141] STAHL, P. ; VON ROHR, P.R.: On the accuracy of void fraction measurements by single-beam gamma-densitometry for gas-liquid two-phase flows in pipes. In: *Experimental Thermal and Fluid Science* 28 (2004), Nr. 6, S. 533–544. – ISSN 0894–1777
- [142] NAZEMI, E. ; FEGHHI, S.A.H. ; ROSHANI, G.H.: Void fraction prediction in two-phase flows independent of the liquid phase density changes. In: *Radiation Measurements* 68 (2014), S. 49 – 54. – ISSN 1350–4487
- [143] NAZEMI, E. ; ROSHANI, G.H. ; FEGHHI, S.A.H. ; SETAYESHI, S. ; ZADEH, E. E. ; FATEHI, A.: Optimization of a method for identifying the flow regime and measuring void fraction in a broad beam gamma-ray attenuation technique. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 41 (2016), Nr. 18, S. 7438 – 7444. – ISSN 0360–3199
- [144] NAZEMI, E. ; FEGHHI, S.A.H. ; ROSHANI, G.H. ; PEYVANDI, R. G. ; SETAYESHI, S.: Precise Void Fraction Measurement in Two-phase Flows Independent of the Flow Regime Using Gamma-ray Attenuation. In: *Nuclear Engineering and Technology* 48 (2016), Nr. 1, S. 64 – 71. – ISSN 1738–5733

-
- [145] MISHIMA, K. ; HIBIKI, T.: Quantitative limits of thermal and fluid phenomena measurements using the neutron attenuation characteristics of materials. In: *Experimental Thermal and Fluid Science* 12 (1996), Nr. 4, S. 461–472. – ISSN 0894–1777
- [146] SAITO, Y. ; MISHIMA, K. ; TOBITA, Y. ; SUZUKI, T. ; MATSUBAYASHI, M.: Measurements of liquid-metal two-phase flow by using neutron radiography and electrical conductivity probe. In: *Experimental Thermal and Fluid Science* 29 (2005), Nr. 3, S. 323–330. – Third European-Japanese Two-Phase Flow Group Meeting. – ISSN 0894–1777
- [147] JONES, O.C. ; ZUBER, N.: The interrelation between void fraction fluctuations and flow patterns in two-phase flow. In: *International Journal of Multiphase Flow* 2 (1975), Nr. 3, S. 273 – 306. – ISSN 0301–9322
- [148] COLLINS, J.R.: Change in the Infra-Red Absorption Spectrum of Water with Temperature. In: *Phys. Rev.* 26 (1925), Dec, S. 771–779
- [149] COMMONER, B. ; LIPKIN, D.: The Application of the Beer-Lambert Law to Optically Anisotropic Systems. In: *Science* 110 (1949), Nr. 2845, S. 41–43. – ISSN 0036–8075
- [150] HALE, G.M. ; QUERRY, M.R.: Optical Constants of Water in the 200-nm to 200- μ m Wavelength Region. In: *Appl. Opt.* 12 (1973), Mar, Nr. 3, S. 555–563
- [151] HIMMELSBACH, J. ; NOLL, B. ; WITTIG, S.: Experimental and numerical studies of evaporating wavy fuel films in turbulent air flow. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 37 (1994), Nr. 8, S. 1217–1226. – ISSN 0017–9310
- [152] BARTER, J.D. ; LEE, P.H.Y.: Real-time wave-amplitude spectrum analyzer for air-liquid interfaces. In: *Applied Physics Letters* 64 (1994), Nr. 15, S. 1896–1898
- [153] MÜLLER, H. ; BELLMANN, H. ; HIMMELSBACH, J. ; ELSÄSSER, A. ; SAMENFINK, W. ; HALLMANN, M.: Mixture preparation and wall film behavior in suction pipes of SI-engines. In: *Motortechnische Zeitschrift* 55 (1994), 04, Nr. 4, S. 220–226
- [154] MOUZA, A.A. ; VLACHOS, N.A. ; PARAS, S.V. ; KARABELAS, A.J.: Measurement of liquid film thickness using a laser light absorption method. In: *Experiments in Fluids* 28 (2000), Apr, Nr. 4, S. 355–359. – ISSN 1432–1114
- [155] YANG, H. ; GRESZIK, D. ; DREIER, T. ; SCHULZ, C.: Simultaneous measurement of liquid water film thickness and vapor temperature using near-infrared tunable diode laser spectroscopy. In: *Applied Physics B* 99 (2010), May, Nr. 3, S. 385–390. – ISSN 1432–0649
- [156] GRESZIK, D. ; YANG, H. ; DREIER, T. ; SCHULZ, C.: Measurement of water film thickness by laser-induced fluorescence and Raman imaging. In: *Applied Physics B* 102 (2011), Jan, Nr. 1, S. 123–132. – ISSN 1432–0649

- [157] YANG, H.: *Tunable diode-laser absorption-based sensors for the detection of water vapor concentration, film thickness and temperature*, Universität Duisburg-Essen, Diss., 2012. – Fak. f. Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Diss. v. 12.01.2012
- [158] SEIDEL, A. ; WAGNER, S. ; EBERT, V.: Open-path diode laser spectrometer based on retro-reflective foils. In: *DGaO Proceedings 2013*, The German Branch of the European Optical Society, 2013
- [159] MENDEZ, M.A. ; NÉMETH, L. ; BUCHLIN, J.: Measurement of Liquid Film Thickness via Light Absorption and Laser Tomography. In: *EPJ Web of Conferences* 114 (2016), S. 02072
- [160] PAN, R. ; BROCKSIEPER, C. ; JEFFRIES, J. B. ; DREIER, T. ; SCHULZ, C.: Diode laser-based standoff absorption measurement of water film thickness in retro-reflection. In: *Applied Physics B* 122 (2016), Sep, Nr. 9, S. 249. – ISSN 1432–0649
- [161] WANG, C. ; ZHAO, N. ; FANG, L. ; ZHANG, T. ; FENG, Y.: Void fraction measurement using NIR technology for horizontal wet-gas annular flow. In: *Experimental Thermal and Fluid Science* 76 (2016), S. 98 – 108. – ISSN 0894–1777
- [162] SCHMIDT, A. ; KÜHNREICH, B. ; KITTEL, H. ; TROPEA, C. ; ROISMAN, I.V. ; DREIZLER, A. ; WAGNER, S.: Diode Laser Based Film Thickness Measurement of DEF. In: *Imaging and Applied Optics 2018 (3D, AO, AIO, COSI, DH, IS, LACSEA, LS&C, MATH, pcAOP)*, Optical Society of America, 2018, S. LM3C.3
- [163] LUBNOW, M. ; DREIER, T. ; SCHULZ, C.: Water Film Thickness Imaging based on Time-Multiplexed Near-Infrared Absorption. In: *Imaging and Applied Optics 2018 (3D, AO, AIO, COSI, DH, IS, LACSEA, LS&C, MATH, pcAOP)*, Optical Society of America, 2018, S. LW2C.3
- [164] LUBNOW, M. ; JEFFRIES, J.B. ; DREIER, T. ; SCHULZ, C.: Water Film Thickness Imaging based on Time-Multiplexed Near-Infrared Absorption. In: *Optics Express* Bd. 26, 2018, S. 332132
- [165] ZAITSEV, D.V. ; KABOV, O.A. ; EVSEEV, A.R.: Measurement of locally heated liquid film thickness by a double-fiber optical probe. In: *Experiments in Fluids* 34 (2003), Jun, Nr. 6, S. 748–754. – ISSN 1432–1114
- [166] BUFFONE, C. ; GLUSHCHUK, A. ; SAVERIO IORIO, C. ; DUBOIS, F.: Measurement of Film Thickness on a Curved Surface by Fiber Optic Probe. In: *Journal of Electronics Cooling and Thermal Control* 3 (2013), 01, S. 22–26
- [167] THAN, C.F. ; TEE, K.C. ; LOW, K.S. ; TSO, C.P.: Optical measurement of slope, thickness and velocity in liquid film flow. In: *Smart Materials and Structures* 2 (1993), Nr. 1, S. 13

- [168] YU, S.C.M. ; TSO, C.P. ; LIEW, R.: Analysis of thin film thickness determination in two-phase flow using a multifiber optical sensor. In: *Applied Mathematical Modelling* 20 (1996), Nr. 7, S. 540–548. – ISSN 0307–904X
- [169] EVERS, L.W. ; JACKSON, K.J.: Liquid Film Thickness Measurements by Means of Internally Reflected Light. In: *SAE Technical Paper*, SAE International, 02 1995
- [170] ALEKSEENKO, S.V. ; BOBYLEV, A.V. ; EVSEEV, A.R. ; KARSTEN, V.M. ; MARKOVICH, D.M. ; TARASOV, B.V.: Measurements of the Liquid-Film Thickness by a Fiber-Optic Probe. In: *Instruments and Experimental Techniques* 46 (2003), Mar, Nr. 2, S. 260–264. – ISSN 1608–3180
- [171] KABARDIN, I.K. ; MELEDIN, V.G. ; ELISEEV, I.A. ; RAKHMANOV, V.V.: Optical measurement of instantaneous liquid film thickness based on total internal reflection. In: *Journal of Engineering Thermophysics* 20 (2011), Dec, Nr. 4, S. 407–415. – ISSN 1990–5432
- [172] HURLBURT, E.T. ; NEWELL, T.A.: Optical measurement of liquid film thickness and wave velocity in liquid film flows. In: *Experiments in Fluids* 21 (1996), Sep, Nr. 5, S. 357–362. – ISSN 1432–1114
- [173] OPSAL, J. ; ROSENCWAIG, A. ; WILLENBORG, D.L.: Thermal-wave detection and thin-film thickness measurements with laser beam deflection. In: *Appl. Opt.* 22 (1983), Oct, Nr. 20, S. 3169–3176
- [174] OHYAMA, T. ; ENDOH, K. ; MIKAMI, A. ; MORI, Y.H.: Optical interferometry for measuring instantaneous thickness of transparent solid and liquid films. In: *Review of Scientific Instruments* 59 (1988), Nr. 9, S. 2018–2022
- [175] MAEREFAT, M. ; FUJIKAWA, S. ; AKAMATSU, T. ; GOTO, T. ; MIZUTANI, T.: An experimental study of non-equilibrium vapour condensation in a shock-tube. In: *Experiments in Fluids* 7 (1989), Sep, Nr. 8, S. 513–520. – ISSN 1432–1114
- [176] NOZHAT, W.M.: Measurement of liquid-film thickness by laser interferometry. In: *Appl. Opt.* 36 (1997), Oct, Nr. 30, S. 7864–7869
- [177] KIM, S. ; KIM, G.: Thickness-profile measurement of transparent thin-film layers by white-light scanning interferometry. In: *Appl. Opt.* 38 (1999), Oct, Nr. 28, S. 5968–5973
- [178] DEBNATH, S.K. ; KOTHIYAL, M.P. ; SCHMIT, J. ; HARIHARAN, P.: Spectrally resolved phase-shifting interferometry of transparent thin films: sensitivity of thickness measurements. In: *Appl. Opt.* 45 (2006), Dec, Nr. 34, S. 8636–8640
- [179] BORGETTO, N. ; GALIZZI, C. ; ANDRÉ, F. ; ESCUDIÉ, D.: A thickness measurement technique based on low-coherence interferometry applied to a liquid film with thermal gradient. In: *Experimental Thermal and Fluid Science* 34 (2010), Nr. 8, S. 1242 – 1246. – ISSN 0894–1777

- [180] JIANG, X. ; WANG, K. ; GAO, F. ; MUHAMEDSALIH, H.: Fast surface measurement using wavelength scanning interferometry with compensation of environmental noise. In: *Appl. Opt.* 49 (2010), May, Nr. 15, S. 2903–2909
- [181] GAO, F. ; MUHAMEDSALIH, H. ; JIANG, X.: Surface and thickness measurement of a transparent film using wavelength scanning interferometry. In: *Opt. Express* 20 (2012), Sep, Nr. 19, S. 21450–21456
- [182] WANG, X. ; QIU, H.: Fringe probing of liquid film thickness of a plug bubble in a micropipe. In: *Measurement Science and Technology* 16 (2005), Nr. 2, S. 594
- [183] PANCHAMGAM, S.S. ; PLAWSKY, J.L. ; WAYNER, P.C.: Microscale heat transfer in an evaporating moving extended meniscus. In: *Experimental Thermal and Fluid Science* 30 (2006), Nr. 8, S. 745 – 754. – ECI International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale. – ISSN 0894–1777
- [184] KARIYASAKI, A. ; YAMASAKI, Y. ; KAGAWA, M. ; NAGASHIMA, T. ; OUSAKA, A. ; MOROOKA, S.: Measurement of Liquid Film Thickness by a Fringe Method. In: *Heat Transfer Engineering* 30 (2009), Nr. 1-2, S. 28–36
- [185] KÜHNER, M. ; SACKMANN, E.: Ultrathin Hydrated Dextran Films Grafted on Glass: Preparation and Characterization of Structural, Viscous, and Elastic Properties by Quantitative Microinterferometry. In: *Langmuir* 12 (1996), Nr. 20, S. 4866–4876
- [186] WIEGAND, G. ; NEUMAIER, K.R. ; SACKMANN, E.: Microinterferometry: three-dimensional reconstruction of surface microtopography for thin-film and wetting studies by reflection interference contrast microscopy (RICM). In: *Appl. Opt.* 37 (1998), Oct, Nr. 29, S. 6892–6905
- [187] BEREJNOV, V. ; LI, D. *A simple method of measuring profiles of thin liquid films for microfluidics experiments by means of interference reflection microscopy*. Cornell University Library. Juni 2010
- [188] ÖZDEMİR, İ.B. ; WHITELAW, J.H.: An optical method for the measurement of unsteady film thickness. In: *Experiments in Fluids* 13 (1992), Sep, Nr. 5, S. 321–331. – ISSN 1432–1114
- [189] COHEN-SABBAN, J. ; GAILLARD-GROLEAS, J. ; CREPIN, P.J.: Quasi-confocal extended field surface sensing. In: *Proc. SPIE 4449, Optical Metrology Roadmap for the Semiconductor, Optical, and Data Storage Industries II, San Diego, CA, United States* Bd. 4449, 2001, S. 177–183
- [190] KUNKEL, M. ; SCHULZE, J.: Mittendicke von Linsen beruehrungslos messen. In: *Photonik* 52 (2004), Dezember, Nr. 6
- [191] LEL, V.V. ; AL-SIBAI, F. ; LEEFKEN, A. ; RENZ, U.: Local thickness and wave velocity measurement of wavy films with a chromatic confocal imaging method and a fluorescence intensity technique. In: *Experiments in Fluids* 39 (2005), Nov, Nr. 5, S. 856–864. – ISSN 1432–1114

- [192] GAMBARYAN-ROISMAN, T. ; STEPHAN, P.: Analysis of Falling Film Evaporation on Grooved Surfaces. In: *Journal of Enhanced Heat Transfer* 10 (2003), Nr. 4, S. 445–458. – ISSN 1065–5131
- [193] RULLIÈRE, R. ; LEFÈVRE, F. ; LALLEMAND, M.: Prediction of the maximum heat transfer capability of two-phase heat spreaders – Experimental validation. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 50 (2007), Nr. 7, S. 1255–1262. – ISSN 0017–9310
- [194] ZHOU, D.W. ; GAMBARYAN-ROISMAN, T. ; STEPHAN, P.: Measurement of water falling film thickness to flat plate using confocal chromatic sensing technique. In: *Experimental Thermal and Fluid Science* 33 (2009), Nr. 2, S. 273 – 283. – ISSN 0894–1777
- [195] PRECITEC-OPTRONIK: *Benutzerhandbuch CHRcodile 2 S/2 SE*. Neu-Isenburg, Deutschland: Precitec GmbH & Co. KG, 2018
- [196] TAKAMASA, T. ; HAZUKU, T.: Measuring interfacial waves on film flowing down a vertical plate wall in the entry region using laser focus displacement meters. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 43 (2000), Nr. 15, S. 2807 – 2819. – ISSN 0017–9310
- [197] TAKAMASA, T. ; KOBAYASHI, K.: Measuring interfacial waves on film flowing down tube inner wall using laser focus displacement meter. In: *International Journal of Multiphase Flow* 26 (2000), Nr. 9, S. 1493 – 1507. – ISSN 0301–9322
- [198] BUSAM, S.S. ; EBNER, J.J. ; WITTIG, S.S.: An Experimental Study of Liquid Film Thickness in Annular Air/Oil Flow in a Vertical Pipe Using a Laser Focus Displacement Meter. In: *Heat Transfer; Electric Power; Industrial and Cogeneration* Bd. 3 ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, 2001, S. V003T01A003
- [199] EBNER, J. ; GERENDÁS, M. ; SCHÄFER, O. ; WITTIG, S.: Droplet Entrainment From a Shear-Driven Liquid Wall Film in Inclined Ducts: Experimental Study and Correlation Comparison. In: *Heat Transfer; Electric Power; Industrial and Cogeneration* Bd. 3 ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, 2001, S. V003T01A002
- [200] HAZUKU, T. ; FUKAMACHI, N. ; TAKAMASA, T. ; HIBIKI, T. ; ISHII, M.: Measurement of liquid film in microchannels using a laser focus displacement meter. In: *Experiments in Fluids* 38 (2005), Jun, Nr. 6, S. 780–788. – ISSN 1432–1114
- [201] WEGENER, J.L. ; DRALLMEIER, J.A.: Measurement of Thin Liquid Film Characteristics using Laser Focus Displacement Instruments for Atomization Applications. In: *ILASS - Americas 22nd Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Cincinnati, OH*, 2010
- [202] HAN, Y. ; SHIKAZONO, N. ; KASAGI, N.: Measurement of liquid film thickness in a micro parallel channel with interferometer and laser focus displacement meter. In: *International Journal of Multiphase Flow* 37 (2011), Nr. 1, S. 36 – 45. – ISSN 0301–9322

- [203] PIERCE, D.S. ; NG, T.S. ; MORRISON, B.R.: A novel laser triangulation technique for high precision distance measurement. In: *Conference Record of the 1992 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting* Bd. 2, 1992, S. 1762–1769
- [204] AMANN, M.-C. ; BOSCH, T.M. ; LESCURE, M. ; MYLLYLAE, R.A. ; RIOUX, M.: Laser ranging: a critical review of unusual techniques for distance measurement. In: *Optical Engineering* 40 (2001), Nr. 1
- [205] LOMBARDO, V. ; MARZULLI, T. ; PAPPALLETTERE, C. ; SFORZA, P.: A time-of-scan laser triangulation technique for distance measurements. In: *Optics and Lasers in Engineering* 39 (2003), Nr. 2, S. 247 – 254. – Optics in Italy III. – ISSN 0143–8166
- [206] PETERSON, J.P. ; PETERSON, R.B.: Laser triangulation for liquid film thickness measurements through multiple interfaces. In: *Appl. Opt.* 45 (2006), Jul, Nr. 20, S. 4916–4926
- [207] QIENI, L. ; BAOZHEN, G. ; WENDA, Y. ; YIMO, Z.: A method for measuring the thickness of transparent oil film on water surface using laser trigonometry. In: *Optics and Lasers in Engineering* 49 (2011), Nr. 1, S. 13 – 15. – ISSN 0143–8166
- [208] BAOZHEN, G. ; JINGBIN, S. ; PENGCHENG, L. ; QIENI, L. ; DI, W.: Designing an optical set-up of differential laser triangulation for oil film thickness measurement on water. In: *Review of Scientific Instruments* 84 (2013), Nr. 1, S. 013105
- [209] KEYENCE: *Benutzerhandbuch Modellreihe LK-G5000*. Neu-Isenburg, Deutschland: Keyence Deutschland GmbH, 2018
- [210] SCHMITT, R.L. ; STEVENSON, W.H. ; STEVENSON, H.C.: Optical measurement of liquid film thickness. In: *Proceedings of the Inspections, Measurement and Control Symposium, International Congress of Applications of Lasers and Electro-Optics 1982, Laser Institute of America (LIA), LIA, Boston, MA* 33 (1982), S. 31–35
- [211] DRISCOLL, D.I. ; SCHMITT, R.L. ; STEVENSON, W.H.: Thin Flowing Liquid Film Thickness Measurement by Laser Induced Fluorescence. In: *Journal of Fluids Engineering* 114 (1992), März, Nr. 1, S. 107–112. – ISSN 0098–2202
- [212] ECKBRETH, A.C.: *Laser diagnostics for combustion temperature and species*. Amsterdam, The Netherlands : Gordon and Breach Publishers, 10 1996
- [213] FUJIKAWA, T. ; HATTORI, Y. ; KOIKE, M. ; AKIHIMA, K. ; KOBAYASHI, T. ; MATSUSHITA, S.: Quantitative 2-D Fuel Distribution Measurements in a Direct-Injection Gasoline Engine Using Laser-Induced Fluorescence Technique. In: *JSME International Journal Series B* 42 (1999), Nr. 4, S. 760–767
- [214] HIDROVO, C.H. ; HART, D.P.: Emission reabsorption laser induced fluorescence (ER-LIF) film thickness measurement. In: *Measurement Science and Technology* 12 (2001), Nr. 4, S. 467
- [215] DOMANN, R. ; HARDALUPAS, Y.: Spatial distribution of fluorescence intensity within large droplets and its dependence on dye concentration. In: *Appl. Opt.* 40 (2001), Jul, Nr. 21, S. 3586–3597

- [216] DAVY, M. ; WILLIAMS, P. ; HAN, D. ; STEEPER, R.: Evaporation characteristics of the 3-pentanone-isooctane binary system. In: *Experiments in Fluids* 35 (2003), Jul, Nr. 1, S. 92–99. – ISSN 1432–1114
- [217] DÜWEL, I. ; SCHORR, J. ; PEUSER, P. ; ZELLER, P. ; WOLFRUM, J. ; SCHULZ, C.: Spray diagnostics using an all-solid-state Nd:YAlO₃ laser and fluorescence tracers in commercial gasoline and diesel fuels. In: *Applied Physics B* 79 (2004), Jul, Nr. 2, S. 249–254. – ISSN 1432–0649
- [218] SCHULZ, C. ; SICK, V.: Tracer-LIF diagnostics: quantitative measurement of fuel concentration, temperature and fuel/air ratio in practical combustion systems. In: *Progress in Energy and Combustion Science* 31 (2005), Nr. 1, S. 75 – 121. – ISSN 0360–1285
- [219] KAY, P.J.: *Characterising thermofluid spray dynamics for energyefficient automotive engines*, Cardiff University, Diss., 2006
- [220] SCHAGEN, A. ; MODIGELL, M.: Local film thickness and temperature distribution measurement in wavy liquid films with a laser-induced luminescence technique. In: *Experiments in Fluids* 43 (2007), 08, Nr. 2, S. 209–221
- [221] CHENG, Y. ; DENG, K. ; LI, T.: Measurement and simulation of wall-wetted fuel film thickness. In: *International Journal of Thermal Sciences* 49 (2010), Nr. 4, S. 733 – 739. – ISSN 1290–0729
- [222] ALONSO, M. ; KAY, P.J. ; BOWEN, P.J. ; GILCHRIST, R. ; SAPSFORD, S.: A laser induced fluorescence technique for quantifying transient liquid fuel films utilising total internal reflection. In: *Experiments in Fluids* 48 (2010), Jan, Nr. 1, S. 133–142. – ISSN 1432–1114
- [223] GRESZIK, D.: *Entwicklung eines laseroptischen Messverfahrens zur Quantifizierung der Schichtdicke von Wasserfilmen*. 1. Aufl. Göttingen : Cuvillier, 2011. – Zugl.: Duisburg, Essen, Univ., Diss., 2011. – ISBN 9783869558585
- [224] CHERDANTSEV, A.V. ; HANN, D.B. ; AZZOPARDI, B.J.: Study of gas-sheared liquid film in horizontal rectangular duct using high-speed LIF technique: Three-dimensional wavy structure and its relation to liquid entrainment. In: *International Journal of Multiphase Flow* 67 (2014), S. 52 – 64. – ISSN 0301–9322
- [225] CHAROGIANNIS, A. ; AN, J.S. ; MARKIDES, C.N.: A simultaneous planar laser-induced fluorescence, particle image velocimetry and particle tracking velocimetry technique for the investigation of thin liquid-film flows. In: *Experimental Thermal and Fluid Science* 68 (2015), S. 516 – 536. – ISSN 0894–1777
- [226] SCHULZ, F. ; SCHMIDT, J. ; BEYRAU, F.: Development of a sensitive experimental set-up for LIF fuel wall film measurements in a pressure vessel. In: *Experiments in Fluids* 56 (2015), May, Nr. 5, S. 98. – ISSN 1432–1114

- [227] FANSLER, T.D. ; DRAKE, M.C.: Optical Diagnostics Applied to Spark-Ignited Direct-Injection Engine Development. In: *5. Int. Symp. für Verbrennungsdiagnostik, Baden-Baden*, 2002
- [228] DRAKE, M.C. ; FANSLER, T.D. ; ROSALIK, M.E.: Quantitative high-speed imaging of piston fuel films in direct-injection engines using a refractive-index-matching technique. In: *ILASS - Americas 22nd Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Madison, WI*, 2002
- [229] DRAKE, M.C. ; FANSLER, T.D. ; SOLOMON, A.S. ; SZEKELY, G.A.: Piston Fuel Films as a Source of Smoke and Hydrocarbon Emissions from a Wall-Controlled Spark-Ignited Direct-Injection Engine. In: *SAE Technical Paper*, SAE International, 03 2003
- [230] DING, C. ; SJÖBERG, M. ; VUILLEUMIER, D. ; REUSS, D.L. ; HE, X. ; BÖHM, B.: Fuel film thickness measurements using refractive index matching in a stratified-charge SI engine operated on E30 and alkylate fuels. In: *Experiments in Fluids* 59 (2018), Feb, Nr. 3, S. 59. – ISSN 1432–1114
- [231] YANG, B. ; GHANDHI, J.: Measurement of Diesel Spray Impingement and Fuel Film Characteristics Using Refractive Index Matching Method. In: *SAE Technical Paper*, SAE International, 04 2007
- [232] MALIGNE, D. ; BRUNEAUX, G.: Time-Resolved Fuel Film Thickness Measurement for Direct Injection SI Engines Using Refractive Index Matching. In: *SAE Technical Paper*, SAE International, 04 2011
- [233] SIPERM: *Siperm R, hochporöser Sinterwerkstoff basierend auf rostfreiem Edelstahl*. Dortmund, Deutschland: Tridelta Siperm GmbH, 2018